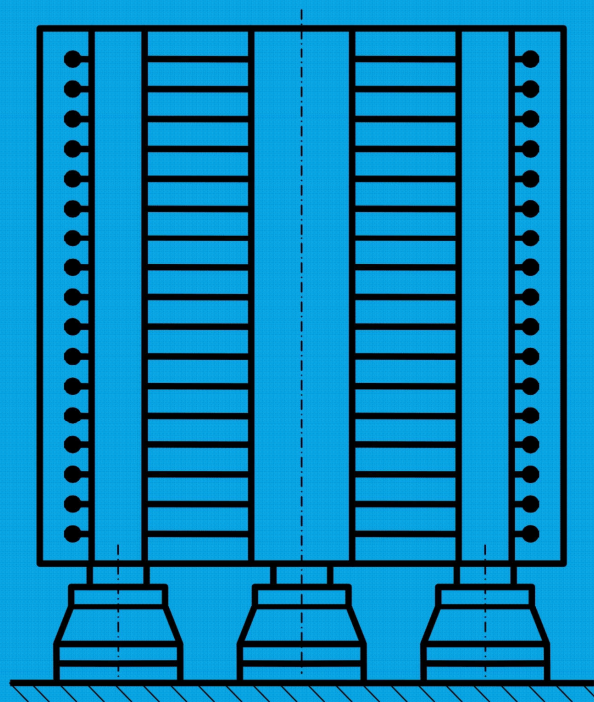
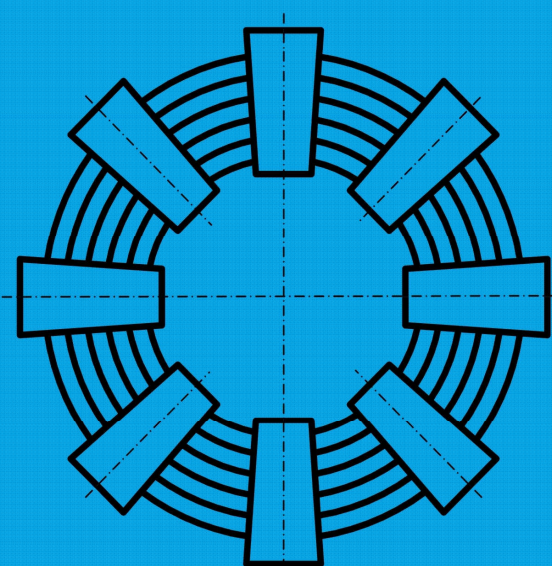


В.И. МИНДРИН М.Н. РЕБРУШКИН

ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ



Нижний Новгород 2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

В.И. МИНДРИН, М.Н. РЕБРУШКИН

ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

*Рекомендовано Ученым советом Нижегородского государственного
технического университета им. Р.Е. Алексеева в качестве учебного пособия
для студентов, обучающихся по специальности 280102*

Нижегород 2013

УДК 658.392(07)

ББК 68.9

М 615

Рецензент

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования объектов
водного транспорта

Волжской государственной академии водного транспорта (Н.Новгород)

О.С. Хватов

Миндрин В.И., Ребрушкин М.Н.

М 615

**Производственная безопасность электрических установок
промышленных предприятий:** учеб. пособие / В.И. Миндрин, М.Н. Ре-
брушкин; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний
Новгород, 2013. – 106 с.

ISBN 978-5-502-00282-0

Содержит сведения по вопросам безопасного обслуживания электрических установок на промышленных предприятиях. Кратко описаны устройства и назначения силовых трансформаторов, токоограничивающих реакторов, электрических приводов постоянного и переменного тока.

Приведены типовые схемы автоматического управления электрическими приводами.

В доступной форме изложены вопросы вибрации электрических машин и их центровка с исполнительными механизмами.

Предназначается для студентов старших курсов, обучающихся по специальности 280102 «Безопасность технологических процессов и производств» при освоении ими курса «Производственная безопасность», а также для студентов вузов и техникумов химико-технологических, машиностроительных, электро- и теплоэнергетических специальностей очной и заочной форм обучения при выполнении самостоятельных работ, курсовых, дипломных и магистерских проектов.

Сведения, содержащиеся в пособии, могут быть использованы широким кругом специалистов, связанных с проектированием, эксплуатацией, ремонтом и безопасной организацией работ на электроустановках.

Рис. 33. Табл. 14. Библиогр.: 17 назв.

УДК 658.392(07)

ББК 68.9

ISBN 978-5-502-00282-0

© Нижегородский государственный
технический университет

им. Р.Е. Алексеева, 2013

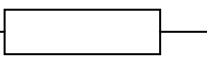
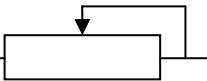



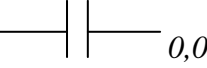
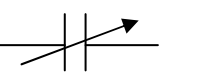


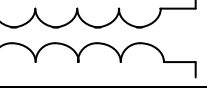
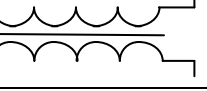
© Миндрин В.И., Ребрушкин М.Н., 2013

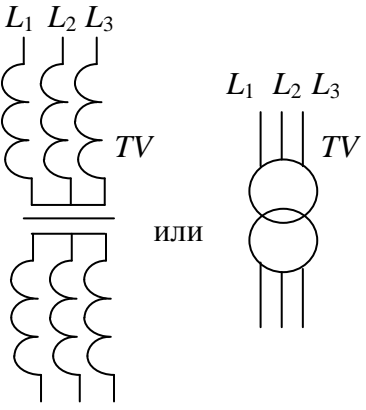
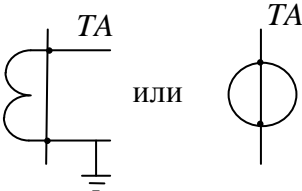
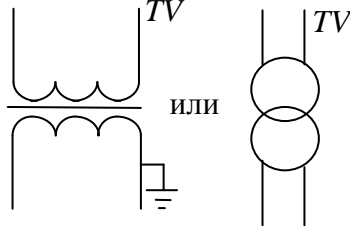
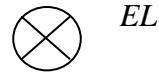
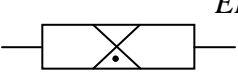

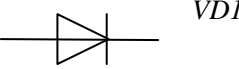
ОГЛАВЛЕНИЕ

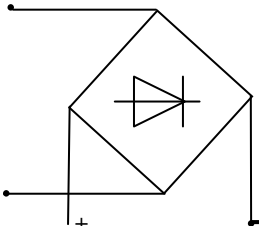
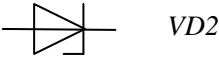
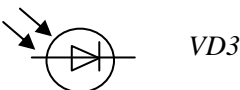

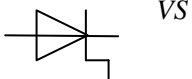
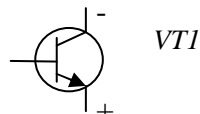
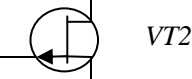


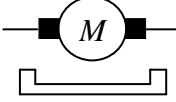
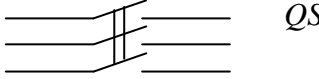
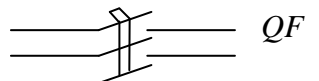
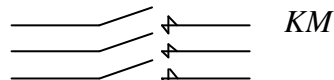
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И УСТРОЙСТВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ.....	5
БУКВЕННЫЕ КОДЫ ЭЛЕМЕНТОВ И УСТРОЙСТВ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ.....	8
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	10
Глава 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	12
1.1. Особенности электрооборудования химических производств....	12
1.2. Основные требования безопасности при производстве работ на электроустановках.....	15
1.3. Классификация персонала по обслуживанию электроустановок..	17
1.4. Классификация электрических установок.....	19
1.5. Классификация видов электрических систем и заземлений в сетях напряжением до 1000В.....	20
1.6. Классификация помещений по электрической опасности. Выбор режима нейтрали источника тока.....	23
1.7. Требования безопасности при обслуживании электроустановок.	25
Глава 2. ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.....	28
2.1. Взрывоопасные зоны. Сведения о взрывоопасных смесях и веществах.....	28
2.2. Выбор и защита электрооборудования во взрывоопасных зонах.	31
2.3. Источники света в производственных помещениях.....	35
Глава 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД. БЕЗОПАСНОСТЬ ОБСЛУЖИВАНИЯ.....	40
3.1. Общие сведения.....	40
3.2. Нагрев и охлаждение двигателей.....	42
3.3. Режимы работы электрического привода.....	43
3.4. Требования безопасности при эксплуатации и ремонте электрических машин.....	44
3.5. Коэффициент мощности электрических установок.....	45
3.6. Компенсация реактивной мощности.....	47
3.7. Повышение коэффициента мощности на промышленных предприятиях.....	49

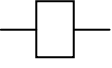



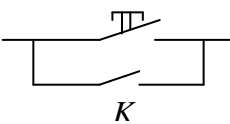
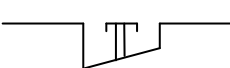
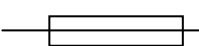
Глава 4. ТРАНСФОРМАТОРЫ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	53
4.1. Силовые трансформаторы. Принцип работы.....	53
4.2. Требования безопасности при эксплуатации и ремонте силовых трансформаторов.....	57
4.3. Надзор за работой силовых трансформаторов (реакторов).....	60
4.4. Измерительные трансформаторы тока и напряжения.....	61
4.5. Сварочные трансформаторы. Безопасность работ.....	64
4.6. Автотрансформаторы. Принцип действия.....	66
4.7. Токоограничивающие реакторы.....	68
Глава 5. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ДВИГАТЕЛЯМИ.....	70
5.1. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором.....	70
5.2. Асинхронные двигатели переменного тока с фазным ротором....	72
5.3. Электрические двигатели постоянного тока.....	74
5.4. Понятие о тиристорном электроприводе.....	76
5.5. Частотно-регулируемый привод асинхронного двигателя.....	77
Глава 6. СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	79
6.1. Средства коллективной защиты.....	81
6.2. Переносные заземления. Порядок наложения и снятия.....	81
6.3. Средства индивидуальной защиты.....	83
6.4. Испытания диэлектрических перчаток. Меры безопасности.....	83
Глава 7. ВИБРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН.....	87
7.1. Причины и средства снижения вибрации.....	87
7.2. Отрицательные последствия вибрации машин.....	94
Глава 8. ЦЕНТРОВКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН.....	98
8.1. Технология центровки роторов насосного агрегата.....	98
8.2. Контроль сопротивления изоляции подшипников электри- ческих машин.....	103
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	106

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И УСТРОЙСТВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ

Наименование	Обозначение на схеме	Расшифровка, назначение
1	2	3
Резисторы:		
- постоянный	R_1 	Для ограничения тока и напряжения, 1 – номер на схеме
- переменный. Силовой реостат	R_2 	Регулирование параметров тока и напряжения
- терморезистор	RK  CT	Сопротивление зависит от температуры
- варистор	RU  CH	Сопротивление зависит от напряжения
- фотосопротивление	$R5$  ΦC	Сопротивление зависит от освещенности
Конденсаторы:		
- постоянной емкости, Н: КП-0,047 мкФ	$C1$  0,047	К - конденсатор. П - источник постоянного тока
- переменной емкости	$C2$ 	Источник реактивной (емкостной) мощности в компенсирующих устройствах
Катушки индуктивности:		
- без сердечника	$L1$ 	Источник переменного магнитного поля
- с сердечником или дроссель ГРЛ	LL 	Ограничитель тока в схемах газоразрядных ламп
Трансформаторы однофазные:		
- без сердечника	T 	В цепях управления, сигнализации мощностью S до 0,1 кВА
- с сердечником	T 	В силовых цепях малой мощности S до 4 кВА

1	2	3
Трансформаторы трехфазные:		
Силовые		<p>Y/Y – соединение обмоток «звезда-звезда» Y/Δ - соединение обмоток «звезда-треугольник»</p>
Измерительные в трехфазных сетях - трансформатор тока		Для питания амперметра на ток до 5 А. Вторичная обмотка и корпус заземлены
- трансформатор напряжения		Для питания вольтметра. Стандартное напряжение – 100В. Вторичная обмотка и корпус заземлены
Лампы осветительные:		
- накаливания		Общее, местное освещение
- газоразрядные лампы – ГРЛ		Общее, местное освещение
- лампы сигнальные		HLR, HLG, HLD – красная, зеленая, желтая лампы
Полупроводниковые приборы:		
- диод		Преобразует переменный ток в постоянный. Используется в выпрямителях, преобразователях частоты, блоках питания и других устройствах

1	2	3
- мост выпрямительный		Мостовая схема выпрямителя тока из четырех диодов
- стабилитрон		Стабилизация постоянного напряжения
- фотодиод		Изменяет значение тока пропорционально освещенности
- светодиод		Излучает свет при прохождении тока
- тиристоры		Применяются в схемах защит, в преобразователях частоты, регуляторах напряжения и других устройствах
Транзисторы: - биполярный		Для генерации, усиления и преобразования электрических сигналов. Питание постоянным током
- полевой		Большое сопротивление 10 МОм
Электрические машины:		
- генератор синхронный		Источник переменного тока в трехфазной сети
- двигатель асинхронный с короткозамкнутым контуром		Для преобразования электрической энергии в механическую
- двигатель постоянного тока (с обмоткой возбуждения)		Для привода механизмов с плавным регулированием частоты вращения
Выключатели трехфазные:		
- не автоматический		Рубильник с боковым рычажным приводом
- автоматический		Выполняется защита ЭУ: максимально токовая от КЗ – I >; тепловая – T >.
- магнитный пускатель с дугогасящими устройствами		Для дистанционного управления двигателями мощностью до 75 кВт

1	2	3
- катушка пускателя или реле	 <i>KM</i>	В цепях управления электрических установок (ЭУ)
- тепловое реле	 <i>KM</i>	Защита ЭУ от перегрузок
- разрядник	 <i>FV</i>	Защита электрооборудования от внутренних и внешних (молния) перенапряжений
Контакты в цепях управления:		
- контакт пускателя, реле, защиты	 <i>K</i>	Нормально разомкнутый
- контакт пускателя, реле, защиты	 <i>K</i>	Нормально замкнутый
- кнопка «ПУСК» с блокирующим контактом	 <i>SB</i> <i>K</i>	Пуск в работу электрических установок
- кнопка «СТОП»	 <i>SB</i> <i>K</i>	Останов электрической машины
Предохранители плавкие	 <i>FU</i>	Защита ЭУ от коротких замыканий

БУКВЕННЫЕ КОДЫ ЭЛЕМЕНТОВ И УСТРОЙСТВ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ

Первая буква кода	Группы элементов и устройств	2 ^й и 3 ^й буквенный код	Вид элементов и устройств
1	2	3	4
<i>A</i>	Устройство	<i>AK</i>	Блок реле
<i>B</i>	Преобразователи неэлектрических величин в электрические	<i>BK</i> <i>BL</i>	Тепловой датчик Фотоэлемент
<i>П</i>	Преобразователь электрических величин	<i>П4</i> <i>ПН</i>	Преобразователь частоты электрического тока Преобразователь напряжения
<i>C</i>	Конденсаторы		
<i>E</i>	Элементы разные	<i>EK</i> <i>EL</i>	Нагревательный элемент (ТЭН) Лампа осветительная
<i>F</i>	Предохранители, разрядники, устройства защиты	<i>FU</i> <i>FV</i>	Предохранители плавкие Разрядники
<i>G</i>	Генераторы источники питания	<i>GB</i>	Батареи аккумуляторные
<i>H</i>	Устройства сигнальные	<i>HL</i>	Приборы световой сигнализации

1	2	3	4
<i>K</i>	Реле, контакты, контакторы пускатели	<i>KA</i> <i>KM</i> <i>KT</i> <i>KV</i>	Реле токовое Контакторы, магнитные пускатели Реле времени Реле напряжения
<i>L</i>	Катушка индуктивности, дроссели	<i>LL</i>	Дроссель газоразрядных ламп
<i>P</i>	Приборы измерительные	<i>PA</i> <i>PV</i> <i>PR</i> <i>PI</i> <i>PK</i>	Амперметры Вольтметры Омметры Счетчик активной энергии Счетчик реактивной энергии
<i>Q</i>	Выключатели и разъединители в силовых цепях	<i>QF</i> <i>QS</i>	Выключатель автоматический Разъединитель-рубильник
<i>R</i>	Резисторы	<i>RK</i> <i>RU</i>	Терморезистор Варистор
<i>S</i>	Устройства коммутации в цепях управления, сигнализации и измерения	<i>SA</i> <i>SF</i> <i>SB</i> <i>SL</i> <i>SP</i> <i>SQ</i> <i>SR</i> <i>SK</i>	Выключатель или переключатель Выключатель автоматический Выключатель кнопочный Выключатель, срабатывающий от уровня Выключатель, срабатывающий от давления Выключатель, срабатывающий от положения Выключатель, срабатывающий от частоты вращения Выключатель, срабатывающий от температуры
<i>T</i>	Трансформаторы	<i>TA</i> <i>TV</i>	Трансформаторы тока Трансформаторы напряжения
<i>V</i>	Приборы полупроводниковые	<i>VP</i> <i>VS</i> <i>VT</i>	Диод Тиристоры Транзисторы
<i>X</i>	Соединения контактные	<i>XA</i> <i>XP</i> <i>XS</i> <i>XT</i> <i>XN</i>	Контакты скользящие Штыри Гнезда Соединения разборные Соединения не разборные
<i>Y</i>	Устройства механические с электромагнитным приводом	<i>YA</i>	Электромagnet

ПРЕДИСЛОВИЕ

Все современные производственные предприятия оснащены различным по назначению и конструктивному исполнению электрическим оборудованием. На большинстве предприятий все производственные машины и исполнительные механизмы приводятся в движение электрической энергией. Она по сравнению с другими видами энергии позволяет с наибольшими удобствами и наилучшим технологическим эффектом осуществлять обработку материалов (нагрев, отжиг, плавка, сварка). В больших масштабах используют действие электрического тока для разложения химических веществ и получения металлов, газов, а также для поверхностной обработки металлов с целью повышения их механической и антикоррозийной устойчивости. Прогрессивные технологические процессы могут быть обеспечены только на основе их широкой электрификации. Применение электротехнологических методов, основанных на использовании электроэнергии непосредственно в технологических процессах, совершенствует общую культуру производства, увеличивает надежность работы оборудования и производительность труда, улучшает санитарно-гигиенические условия, способствует механизации и автоматизации производства и повышает производственную безопасность при обслуживании установок.

Широко применяемое на производствах электрическое оборудование: электрические генераторы и двигатели, силовые, измерительные и сварочные трансформаторы, токоограничивающие реакторы, воздушные и кабельные линии электропередачи и многое другое, все эти устройства, включая сети электрического освещения, стандартом принято называть *электроустановками*.

Производственная безопасность электроустановок определяется, прежде всего, их конструктивным исполнением, текущим состоянием, наличием систем защит, обеспечивающих надежную и безаварийную работу электроустановок, агрегатов и технологических систем в целом. Не менее важным условием обеспечения производственной безопасности является правильная организация эксплуатации электроустановок в соответствии с «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей», «Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей», требованиями противопожарной техники, а также местными производственными инструкциями.

В связи с этим, проектируемая и создаваемая электрическая установка должна быть не только конструктивно технически совершенной, отвечающей всем требованиям *правил*, но и технологичной в изготовлении, надежной и экономичной в эксплуатации, а также безопасной в обслуживании на всех стадиях производства. Как показывают исследования и опыт практической работы, наиболее эффективным мероприятием является внедрение энергосберегающих технологий и энергосберегающего оборудования с

высоким уровнем надежности, обеспечивающей стабильную, безаварийную и экономичную работу электроустановок и предприятия в целом.

Современный период развития рыночных отношений требует от руководителей предприятий (эффективных предпринимателей) эффективных решений не только по развитию бизнеса в поисках выгодного заказа и продажи продукции, но и по снижению экономических потерь внутри своего производства, связанных с состоянием производственной безопасности.

Повысив надежность работы всего производственного и вспомогательного оборудования и устранив возможные аварии, предприятие многократно уменьшает расходы на приобретение запасных частей, на затяжные, трудоемкие и дорогостоящие ремонты, требующие специалистов и производителей высокой квалификации.

Кроме того, режимы остановок и пусков основного оборудования, например, паровых котлов, турбин, турбогенераторов, силовых трансформаторов, установок пиролиза и регенерации газа и др. – это не расчетные режимы работы технических объектов.

При этих режимах КПД предприятия равно нулю. Оборудование работает в холостом режиме: вибрирует, шумит, парит, излучает, идет расход энергоносителей – газа, мазута, электроэнергии, а продукция не производится.

Но главное, все переходные режимы, связанные с ремонтом, ведут, как правило, к увеличению травматизма различной тяжести. Ремонт и травматизм – неизбежные «близнецы»; особенно при низкой квалификации производителей в современных условиях миграции людей в поисках работы и слабой подготовки специалистов высших и средних учебных заведений в последний период по заключению Главного управления Ростехнадзора.

Анализ смертельных случаев, вызванных высокой аварийностью на предприятиях энергетики, строительства и транспорте, показывает, что на долю поражения электрическим током приходится до 40% всех поражений. Большая часть смертельных травм электрическим током наблюдается в электроустановках до 1кВ.

В связи с этим роль подготовки специалистов: инженеров-технологов, инженеров-электриков, инженеров по безопасности технологических процессов и производств многократно возрастает.

Энергетика – многогранная отрасль, требующая знаний не только вопросов тепло- и электроэнергетики, но и знаний законов физики, химии, механики, металлургии и электроники. Энергетика – это отрасль, в которой, как ни в какой другой, нужны дисциплина и слаженный коллективный труд.

ГЛАВА 1

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРЕДПРИЯТИЙ

1.1. ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Энергоемкость химических производств

Одной из особенностей работы электрооборудования химических производств является их высокая энергоемкость. Если доля затрат на энергию в отраслях промышленной продукции (в СССР) составляла 2,5%, то в продукции химической отрасли она достигала 8,9%.

В целом химическая отрасль производила в созидательный период около 6% всей промышленной продукции, а потребляла около 12% всей вырабатываемой в СССР электроэнергии. Эта высокая энергоемкость обусловлена большим потреблением энергии на производство аммиака, фосфора, карбидов кальция и натрия, химических волокон и пластмасс, которое составляло более 60% электрической и 50% тепловой энергии всей отрасли.

В результате установленная мощность на трансформаторных подстанциях современных химических предприятий достигает 100 и более МВ·А. Электрическая энергия в химическом производстве применяется для проведения электрохимических, электротермических и электромагнитных процессов, а также для перемещения веществ при помощи компрессорных и насосных установок.

Источниками электрической энергии для всех отраслей промышленности являются тепловые, гидравлические и атомные электрические станции. Суммарная мощность единой энергетической системы в СССР достигала более 350 млн кВт (350 ГВт). В настоящий период установленная мощность всех электрических станций в Российской Федерации составляет (ориентировочно) 190 млн кВт (190 ГВт). Из них мощность тепловых станций (ТЭС) – 130 ГВт, мощность гидравлических станций (ГЭС) – 40 ГВт и мощность атомных станций (АЭС) – 20 ГВт

Суммарная установленная мощность силовых трансформаторов на НХЗ ОАО «Сибур – Нефтехим» в г. Кстово составляет $P_{эл} = 32000$ кВт (32 МВт или 0,032 ГВт). Подвод электрической энергии к трансформаторным подстанциям осуществляется по двум вводам: из энергосистемы и Ново – Горьковской ТЭЦ напряжением $U_{л} = 110$ кВ.

На предприятиях химической отрасли для целей высокотемпературной обработки сырья (пиролиз природного газа, обжиг и др.) и интенсификации химических реакций применяется тепловая энергия в виде насыщенного и перегретого пара, горячей воды и воздуха. Источниками тепловой энергии на

НХЗ и НПЗ служат теплоэнергетические установки энергоблоков: парогенераторы, котлы-утилизаторы, редуционно-охладительные установки, преобразующие энергию органического топлива в тепловую энергию в виде пара, горячей воды, конденсата и далее в механическую работу в турбинных приводах компрессорных и насосных агрегатах.

В химической промышленности энергетика непосредственно участвует в процессе производства продукции и входит в прямое соединение с химико-технологическим оборудованием и составляет единую энерго-химико-технологическую систему (ЭХТС). Нарушение нормального энергоснабжения вызывает прекращение деятельности отдельных звеньев или предприятия в целом, что может привести к авариям и травмам обслуживающего персонала.

Поэтому особое значение на НХЗ и НПЗ имеют вопросы надежности и бесперебойной работы всего оборудования производственного цикла.

Требования к надежности электроснабжения

Во всех случаях химические производства требуют повышенной надежности обеспечения электроэнергией. По надежности электроснабжения все потребители делятся на *три категории*.

К первой категории относятся потребители, перерыв в электроснабжении которых может вызвать аварийный выход из строя оборудования, привести к гибели людей, к массовому браку продукции или сырья. Для обеспечения особо высокой надежности электроснабжение таких потребителей осуществляется от трех независимых источников: от местной электростанции, от шин энергосистемы и от аккумуляторных батарей – специальных агрегатов системы бесперебойного питания. К первой категории принадлежат основные химические цеха по производству аммиака, ацетилена, углекислоты, сероводорода и т.п. Из общезаводских потребителей к данной категории относят водозабор, насосы оборотного и противопожарного водоснабжения, техническую вентиляцию вредных производств, котельные, диспетчерскую службу энергохозяйства.

Ко второй категории относятся потребители, перерывы в электроснабжении которых вызывают недоработку продукции, простой оборудования и рабочих, но не связаны с аварийными последствиями. Потребители второй категории должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых взаимно резервирующих источников. К таким потребителям относятся предприятия по производству разбавленной азотной кислоты, древесной массы, бумаги, картона, продуктов лесохимии и т.п.

Перерыв в электроснабжении указанных потребителей не должен превышать одного часа.

К третьей категории относятся вспомогательные и бытовые подразделения промышленных предприятий, заводские лаборатории, мастерские, гаражи, столовые, заводоуправление и т.п. Перерыв в электроснабжении потребителей третьей категории не должен превышать одних суток.

Требования к качеству электроэнергии

Как правило, на химических предприятиях предъявляются повышенные требования к качеству электроэнергии.

Согласно ГОСТ 13109-67, показателями качества электроэнергии являются:

- а) отклонения от номинального значения и колебания частоты тока (не более $\pm 0,1$ Гц);
- б) отклонение от номинального значения и колебания напряжения на зажимах силовых (от -5 до +10%) и осветительных (от -2,5 до +5%) электроприемников;
- в) синусоидальность кривой напряжения;
- г) смещение нейтрали при соединении источников и приемников по схеме «звезда»;
- д) не симметрия напряжений по фазам трехфазной сети.

Требования безопасности к производственному оборудованию

Главной задачей на предприятиях химической отрасли является создание и обеспечение безопасных и безвредных условий для персонала при обслуживании взрывоопасного и токсичного оборудования на всех стадиях и режимах его работы, для чего подлежат выполнению следующие требования к производственному оборудованию:

- наличие надежных средств защит, действующих на сигнал или отключение установок при несоответствии эксплуатационных параметров нормативным (расчетным) значениям;
- расположение оборудования, его органов управления и контроля должно соответствовать требованиям безопасности, предъявляемым к рабочим местам обслуживающего персонала;
- выполнение правил безопасности при монтаже (демонтаже), ремонте, транспортировке и хранении оборудования, сырья и производственной продукции;

- выполнение правил электробезопасности на действующем или остановленном оборудовании;
- высокая надежность систем взрывопожаротушения оборудования и производственных помещений;
- наличие на действующем оборудовании предохранительных устройств.

Требования безопасности к производственным процессам

Подлежат выполнению следующие требования к производственным процессам:

- строгое выполнение заданных эксплуатационных параметров всего оборудования в производственном цикле;
- высокая надежность работы систем автоматического управления, контроля и защит оборудования и отдельных устройств технологического цикла;
- широкое применение механизации, автоматизации и дистанционного управления производственными процессами;
- высокий уровень производственной и технологической дисциплины всего персонала и систематический контроль за их соблюдением.

1.2. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАБОТ НА ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Необходимо выполнять следующие основные требования безопасности при производстве работ на электроустановках:

- Производство работ необходимо осуществлять по оформленным нарядам-допускам для работ в электроустановках, в которых указываются необходимые и достаточные меры, обеспечивающие безопасное выполнение работ.
- Соблюдение производственной дисциплины, не допускающей самовольное действие персонала.
- Личная ответственность руководителей, ответственных должностных лиц за безопасное выполнение работ на оборудовании.
- Высокий уровень знаний правил технической эксплуатации и правил электробезопасности устройств и всего оборудования цеха, участка на производстве.
- Постоянно проводить работу с персоналом, осуществляя обучение и проверку знаний. Качественно осуществлять все виды инструктажей, в том числе и целевой инструктаж на рабочем месте перед началом работ.
- Не допускать производство работ на электроустановках без применения переносных заземлений, без проверки отсутствия напряжения и без использования коллективных и индивидуальных средств защиты. Всегда

помнить – выведенное в ремонт и обесточенное, но не заземлённое оборудование считается под напряжением.

- Вести постоянный контроль за производством работ подчинённого персонала.
- Осуществлять проверку выполненных работ на электроустановках после ремонта. Перед включением оборудования в работу проводить его опробование с выводом персонала из зоны ремонта.
- В период работы не допускать нарушения допустимых минимальных расстояний до токоведущих частей электроустановок, находящихся под напряжением. Допустимые минимальные расстояния до токоведущих частей электроустановок, находящихся под напряжением, представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Допустимые минимальные расстояния до токоведущих частей электроустановок, находящихся под напряжением

Напряжение, кВ	От людей, инструментов и ограждений, м	Собственный ремонтный персонал	Строительно-монтажные организации (СМО)
		От грузоподъёмных машин, стропов, грузов, м	От механизмов, стропов, грузов, м
до 1	0,6 на воздушных линиях	1,0	1,5
	В остальных случаях не нормируется (без касания)	1,0	1,5
1-35	0,6	1,0	2,0
110	1,0	1,5	4,0
500	3,5	4,5	5,0
750	5,0	6,0	10,0
1150	8,0	10,0	11,0

- Все токоведущие части, расположенные вблизи рабочего места, где ведутся работы, должны быть ограждены.
- Основным требованием, обеспечивающим безопасность работ, является выдача оформленных нарядов-допусков, разрешающих приступать к работе.

Во взрывопожароопасных зонах на предприятиях химической промышленности действуют следующие четыре вида нарядов-допусков:

- на проведение ремонтных работ;
- на проведение газоопасных работ;
- на проведение огневых работ;
- для работ в электроустановках.

- После полного окончания работ снимаются установленные переносные заземления, временные ограждения, плакаты и электрооборудование сдаются в установленном порядке эксплуатационному персоналу.
- Все виды ремонтов, испытания изоляции, систем защиты электрических машин, аппаратов и трансформаторов, а также устранение неполадок выполняет электротехнический ремонтный персонал, имеющий удостоверение по электрической безопасности не ниже III группы при U до 1000 В и не ниже IV группы при U выше 1000 В.
- Электрооборудование химических производств во взрывобезопасном исполнении принимается после монтажа и ремонта в эксплуатацию после проверки: соответствия его классу помещения; категории группы взрывоопасной смеси; наличия необходимой документации (чертежей, протоколов, испытаний); величин взрывонепроницаемых зазоров, исправности всех видов защит и блокировок.
- При эксплуатации всех видов электрооборудования необходимо следить, чтобы воздух в помещении соответствовал параметрам микроклимата, не имел излишней влаги, не был запыленным и загазованным. Влага и пыль, проникая в оболочку электрооборудования, могут стать причиной искрения и короткого замыкания. Взрывонепроницаемые оболочки необходимо систематически осматривать; не допускать наличие прожогов, трещин, очищать оборудование от пыли, от посторонних предметов и периодически устранять излишнюю влагу. Оборудование с такими дефектами эксплуатировать запрещено.

1.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕРСОНАЛА ПО ОБСЛУЖИВАНИЮ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Согласно «Правилам устройств электроустановок», персонал, обслуживающий электроустановки, классифицируется следующим образом [9]:

А. Неэлектротехнический персонал

Это персонал, который использует бытовые электроустановки (ЭУ) без их монтажа, ремонта и наладки. Сюда входит широкая сеть торговли, водители транспорта, менеджеры, работники банка, студенты при работе за компьютером, работники связи.

Персонал неэлектротехнический по п.1 данных *правил* должен иметь I группу по электрической безопасности, т.е. пройти целевой инструктаж по программе с фиксацией в журнале по технике безопасности с росписью. Удостоверение I группы не электротехническому персоналу не выдаётся.

Б. Электротехнологический персонал

Это персонал, в работе которого использование ЭУ входит в основной вид деятельности, при этом могут регулироваться параметры электрического тока.

К электротехнологическому персоналу относятся, например, электросварщики, операторы электролизёрных, индукционных и других преобразовательных установок, операторы щитов управления производственных процессов и др.

Электротехнологический персонал должен иметь II-III группу по электрической безопасности.

В. Электротехнический персонал

Это персонал, осуществляющий монтаж, ремонт и техническое обслуживание всех видов ЭУ.

Должен обладать знаниями и опытом и иметь удостоверение II, III, IV или V группы по электрической безопасности.

В свою очередь, электротехнический персонал подразделяется:

1. На *административно-технический*: сюда входят руководители и специалисты, организаторы всех видов работ на ЭУ, которые несут полную ответственность за производственную безопасность. Административно-технический персонал должен иметь удостоверения по электрической безопасности III группы при напряжении менее 1000 В и IV, V групп при напряжении ЭУ выше 1000 В.

2. *Оперативно-дежурный (эксплуатационный)*: осуществляет оперативное управление и обслуживание ЭУ, выполняет все коммутационные переключения. Должен иметь удостоверения по электробезопасности III группы при напряжении меньше 1000 В и IV группы при напряжении больше 1000 В. Ведёт подготовку рабочих мест к ремонту и допускает ремонтный персонал до работы.

3. *Оперативно-ремонтный*: выполняет текущий ремонт ЭУ, например, замену светильников, систем освещения, замену предохранителей, установку персональных заземлений, отсоединение и подсоединение концов кабелей к ЭУ и др. Должен иметь удостоверение по электробезопасности III группы при напряжении меньше 1000 В и IV группы при напряжении более 1000 В.

4. *Ремонтный*: выполняет все виды ремонтов, монтаж и реконструкцию электрических схем и устройств. Должен иметь удостоверение по электрической безопасности III группы при напряжении менее 1000 В и IV группы при напряжении свыше 1000 В.

Группа II: стаж работы два месяца в предыдущей группе для инженеров-выпускников вузов и три месяца для практикантов вузов, обладание техническими знаниями ЭУ и правил техники безопасности.

Группа III: стаж работы (см. группу II), знание электротехники, конкретного оборудования, умение обеспечить безопасное ведение работ,

освобождать пострадавшего от действия электрического тока и оказывать первую медицинскую помощь.

1.4. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Согласно «Правилам устройств электроустановок», электроустановки в отношении мер электробезопасности разделяются:

- на электроустановки напряжением до 1000 В в сетях с глухозаземлённой нейтралью;
- электроустановки напряжением до 1000 В в сетях с изолированной нейтралью;
- электроустановки напряжением выше 1000 В с изолированной нейтралью в сетях 6, 10 и 35 кВ с малыми токами замыкания (меньше 500 А);
- электроустановки напряжением выше 1000 В с глухозаземлённой или эффективно заземлённой нейтралью через дугогасящий реактор или резистор в сетях 110, 220 кВ и более с большими токами замыкания (больше 500 А).

Электрическая сеть с эффективно заземлённой нейтралью – это трёхфазная сеть напряжением выше 1000 В, в которой коэффициент замыкания на землю не превышает 1,4. В такой сети в случае замыкания фазного проводника на землю допускается превышение напряжения в незамкнутых проводниках на 40% по отношению к номинальному напряжению. В целях уменьшения токов замыкания на землю или токов короткого замыкания в нейтральных питающих трансформаторов производят установку реакторов с большим индуктивным сопротивлением или резисторов с большим активным сопротивлением. В таких сетях ток замыкания зависит от состояния изоляции и емкости сети относительно земли. На ЛЭПах большой протяженности защитная роль активной изоляции проводников утрачивается полностью – ток замыкается в протяженном емкостном поле «С» на малое емкостное сопротивление $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$. Этим обстоятельством объясняется отсутствие активной изоляции на проводниках воздушных линий электропередачи.

По технологическим требованиям и условиям эксплуатации электроустановок потребителей обмотки трансформаторов переменного тока соединяют либо «звездой», либо «треугольником» (рис. 1.1).

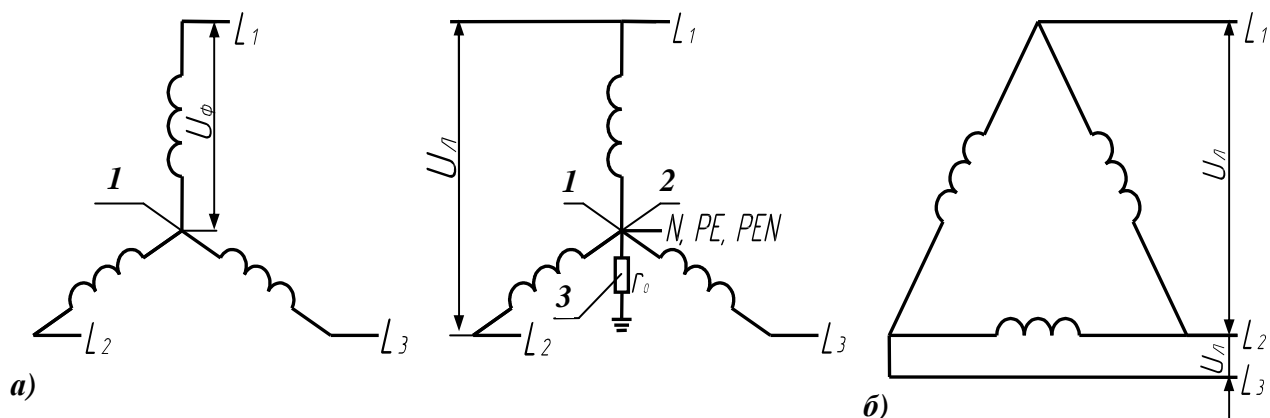


Рис. 1.1. Соединение обмоток трансформаторов напряжением меньше 1000 В:

$U_\phi=220$ В – напряжение фазное; $U_n = U_\phi\sqrt{3} = 380$ В – напряжение линейное;

L_1, L_2, L_3 – фазные проводники;

1 – нейтраль; 2 – нейтральный проводник; N – нулевой рабочий проводник;

PE – нулевой защитный проводник; PEN – нулевой защитный и рабочий проводник; а - соединение звездой; б - соединение треугольником

1.5. КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ЗАЗЕМЛЕНИЙ В СЕТЯХ НАПЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

В соответствии с ПУЭ («Правила устройства электроустановок», 7-е издание, 2002г.), а также в соответствии с международным стандартом P50571 с целью повышения безопасности обслуживания электроустановок введена классификация заземлений и видов электрических систем напряжением до 1000 В.

Требования распространяются на электроустановки (ЭУ):

- производственных, жилых и общественных зданий;
- строительных и монтажных площадок;
- сельскохозяйственных строений и сооружений;
- передвижных и мобильных установок.

Требования относятся к ЭУ в проектируемых, строящихся и реконструируемых зданий и сооружений, а также рекомендуются к применению в действующих электроустановках с целью повышения электрической безопасности

На рис. 1.2, а, б, в представлены классификации видов электрических систем и заземлений в сетях переменного тока напряжением до 1000 В.

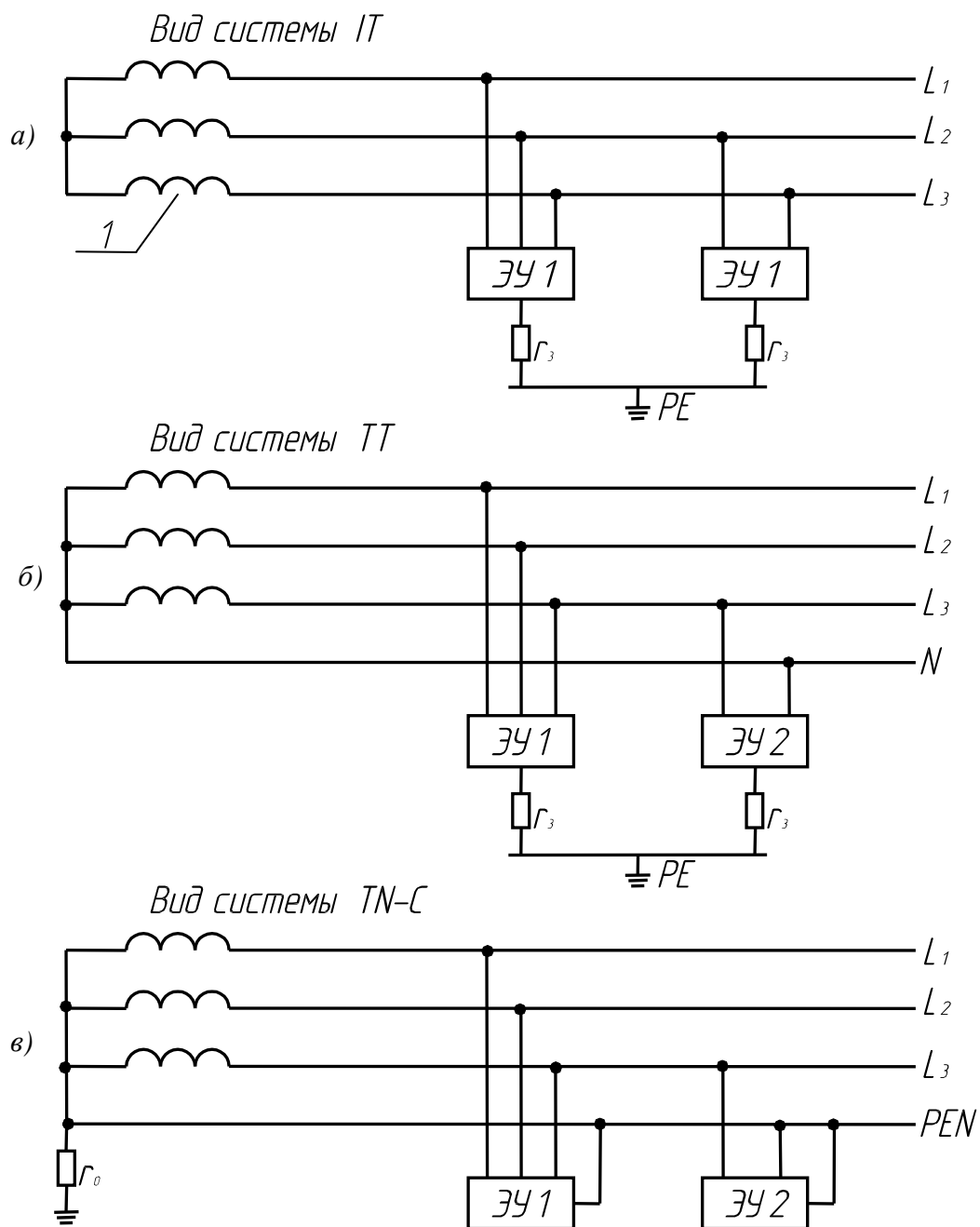


Рис. 1.2. Классификация заземлений и виды электрических систем и заземлений в трех- и четырехпроводных сетях

Классификация видов электрических систем и заземлений в пятипроводных сетях представлена на рис. 1.3, а, б.

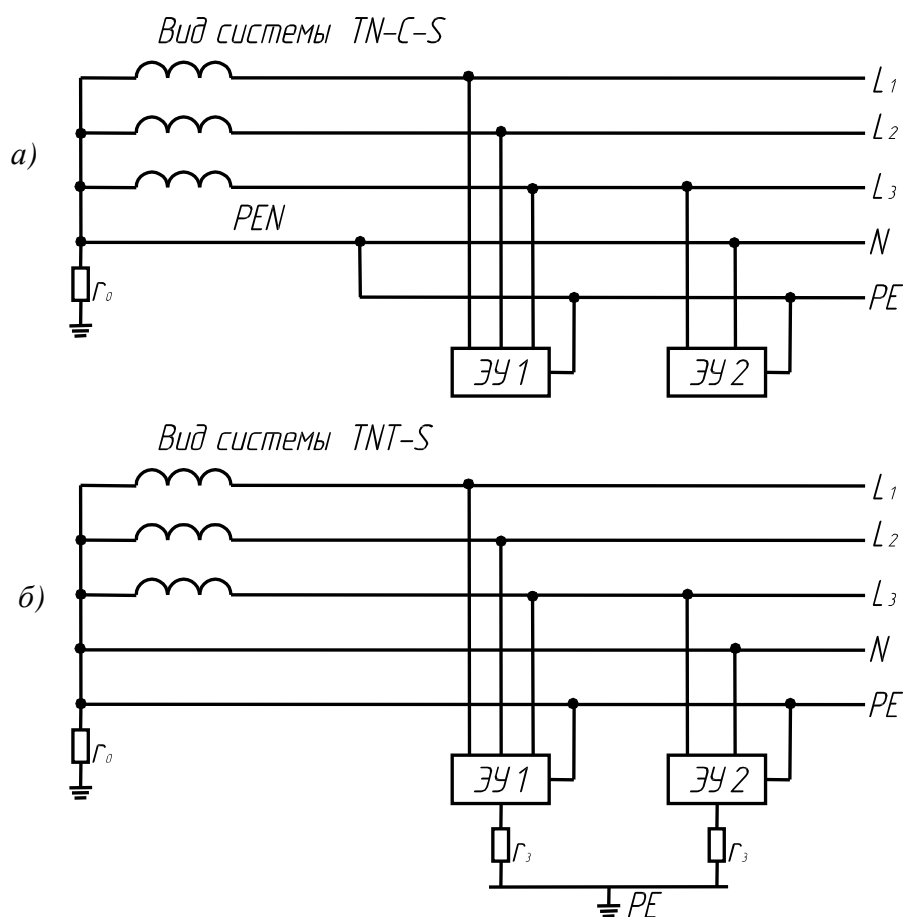


Рис. 1.3. Классификация видов электрических систем и заземлений в пятипроводных сетях:

I – вторичные обмотки трансформаторов, L_1, L_2, L_3 – фазные проводники, ЭУ1 – электроустановка $U = 380\text{В}$; ЭУ2 – электроустановка; $U = 220\text{В}$; N – нулевой рабочий проводник; PE – нулевой защитный проводник и защитные полосы; r_3 – сопротивление защитного заземления; r_0 – сопротивление заземлённой нейтрали трансформатора

Далее представлены значения букв в обозначении систем.

– Первая буква в обозначении системы:

I – нейтраль трансформатора изолирована от земли;

T – нейтраль трансформатора заземлена.

– Вторая буква в обозначении системы:

T – корпуса электроустановок имеют защитное заземление;

N – корпуса электроустановок имеют защитное зануление.

– Последующие буквы в обозначении системы:

C – проводники N и PE совмещены – PEN ;

S – проводники N и PE проложены отдельно;

$C - N$ – часть проводников N и PE проложены совместно – PEN , другая часть проводников N и PE проложены отдельно.

А. Система IT – система трехпроводная с изолированной нейтралью вторичных обмоток трансформатора. Корпуса электроустановок ЭУ1 имеют

защитное заземление. Применяется в грузоподъемных механизмах, и на производствах, где перерывы в работе и остановка оборудования недопустимы по технологии и безопасности работ (металлургические, химические и другие производства). Система *IT* для жилых и общественных зданий – запрещена.

Б. Система *TT* – система четырехпроводная с заземлённой нейтралью в трансформаторе и защитным заземлением корпусов ЭУ. Применяется в обоснованных случаях (см. выше). Использовать защитное зануление недопустимо.

В. Система *TN – C* система четырехпроводная с заземлённой нейтралью в трансформаторе и защитным занулением корпусов электроустановок ЭУ1 и ЭУ2. Проводники *N* и *PE* совмещены.

Г. Система *TN – C – S* – система пятипроводная с заземлённой нейтралью в трансформаторе. Корпуса ЭУ1 и ЭУ2 имеют защитное зануление. В месте подсоединения проводников *N* и *PE* к заземлённой нейтрали допускается их объединение проводником *PEN*.

Д. Система *TNT – S* – система пятипроводная с заземленной нейтралью в трансформаторе. Корпуса электроустановок ЭУ1 и ЭУ2 имеют защитное зануление и заземление. Проводники *N* и *PE* проложены отдельно. Система обязательная для вновь проектируемых, строящихся и реконструируемых зданий и сооружений. Рекомендуется к использованию в действующих электроустановках с целью повышения электробезопасности производственного персонала [9].

1.6. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОМЕЩЕНИЙ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ. ВЫБОР РЕЖИМА НЕЙТРАЛИ ИСТОЧНИКА ТОКА

Опасность поражения человека электрическим током зависит от состояния окружающей среды. Сырость, токопроводящая пыль, пары, газы разрушают изоляцию, снижают её сопротивление. При высокой температуре окружающего воздуха понижается электрическое сопротивление человека. Воздействие тока на человека усугубляется наличием токопроводящих полов и близким расположением электроустановки (ЭУ) к металлическим заземляющим устройствам, например, к системам отопления или водоснабжения.

Согласно ПУЭ, все помещения по электрической опасности делятся на *три класса*.

К помещениям I класса – без повышенной опасности, относятся сухие помещения с относительной влажностью не более 60%, беспыльные с нормальной температурой воздуха $t_n = t_{\text{норм}}$ с изолированными полами (деревянные, линолеум).

Например: жилые помещения, офисы, аудитории, лаборатории.

К помещениям II класса – с повышенной опасностью, относятся влажные помещения, в которых относительная влажность длительно $\varphi \geq 75\%$, жаркие, где температура воздуха длительно или периодически превышает 35°C . Помещения пыльные (угольная и др. пыль, которая оседает на проводниках), помещения с токопроводящими полами (металл, бетон, кирпич и др.), в которых возможно одновременное прикосновение к металлическим конструкциям.

Например: производственные цеха, склады, мастерские и др.

К помещениям III класса – особо опасные – помещения сырые с относительной влажностью $\varphi \approx 100\%$ – стены покрыты влагой, химические активные среды с выделением паров, газов. Всё это разрушает изоляцию.

Например: цехи электростанций, помещения аккумуляторных батарей, территории открытых помещений, где размещены наружные ЭУ, все подземные помещения.

Выбор схемы сети, вида системы, а также режима нейтрали источника тока производится по технологическим требованиям и по условиям безопасности обслуживания электрических установок.

В сетях при напряжении до 1000В

По технологическим требованиям получили распространение четырехпроводные или вновь сооружаемые пятипроводные схемы (сети) с заземлённой нейтралью трансформатора, т.е. систем *TN-C* (четырёхпроводные) и *TN-S* (пятипроводные). Такие сети позволяют обеспечить силовые нагрузки $U = 380\text{В}$ и осветительные $U = 220\text{В}$.

По условиям безопасности сети в нормальном режиме более безопасны с изолированной нейтралью (*IT*), а в аварийном, особо опасном режиме, более безопасны с заземлённой нейтралью (*T*). Но сети с изолированной нейтралью не позволяют применять средство защиты – зануление или отключение, автоматически отключающие повреждённую установку. Поэтому в жилых помещениях и общественных зданиях сети с изолированной нейтралью не используются (запрещены), но применяются на транспорте, в передвижных ЭУ, на грузоподъёмных кранах и на специальных установках в промышленности, где отключение повреждённых ЭУ не допускается. В результате в сетях $U < 1000\text{В}$ по условию безопасности так же, как и по условиям технологическим, распространены четырех- и пятипроводные сети с глухозаземлённой нейтралью с защитным заземлением *TT-S* и занулением *TN-C* или *TN-S*.

В сетях при напряжении выше 1000В

По технологическим требованиям выбор режима нейтрали обусловлен:

- недопущением внутренних перенапряжений в сетях в случае замыкания проводника на землю;
- быстрым поиском аварийного участка сети и отключением его из работы.

Из этих соображений предпочтение отдаётся глухозаземлённой нейтрали, которая позволяет установить защитное реле с воздействием на схему отключения. При этом защитная роль изоляции в сетях линии электропередач (ЛЭП) большой протяженностью вследствие большой

ёмкости «С» полностью утрачивается и для человека одинаково опасно прикосновение к проводнику в сети как с изолированной, так и с заземлённой нейтралью. Ток замыкается на большую ёмкость проводников.

При замыкании проводника на землю в этом месте образуются большие потенциалы, опасные для напряжения шага и прикосновения и длительно действуют при изолированной нейтрали. При глухозаземлённой нейтрали произойдёт быстрое отключение сети или участка сети релейной защитой или защитным занулением.

Конкретно:

– В сетях с напряжением до 35 кВ включительно ПУЭ предусматривает режим работы с изолированной нейтралью. При токах замыкания $I_{\text{зм}} < 500 \text{ А}$ и с заземлённой нейтралью с установкой в ней приборов защиты с большим сопротивлением.

– В сетях напряжением 110 кВ и выше применяется эффективно заземленная нейтраль с малым сопротивлением, или присоединение нейтрали трансформатора непосредственно (наглухо) к заземлителю для того, чтобы напряжение в сети при замыкании на землю $U_{\text{зам}}$ не превысило $1,4 \cdot U_{\text{ф}}$.

1.7. ТРЕБОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Все условия, обеспечивающие ведение и безопасность технологических процессов на производстве излагаются в технологическом регламенте предприятия. Соблюдение требований регламента гарантирует сохранность оборудования, надежную и безаварийную работу и, главное, обеспечивает безопасность эксплуатации производственных объектов.

Для обеспечения производственной безопасности наиболее важным в технологическом регламенте является раздел «Основные правила эксплуатации электрооборудования». Он разработан на основании требований «Правил устройства электроустановок» (ПУЭ), «Правил эксплуатации электроустановок потребителей» (ПЭЭП) и «Правил техники безопасности» (ПТБ) при эксплуатации электроустановок. Для успешной работы любого промышленного предприятия необходимо организовывать эксплуатацию электрооборудования таким образом, чтобы она была технически правильной, экономичной и безопасной. Серьезные нарушения нормальной работы электрохозяйства обычно снижают производительность труда, объем и качество продукции, увеличивают перерасход электроэнергии и производственный травматизм. Поддержание предусмотренных в проекте и регламенте технических средств защиты в исправном состоянии и строгое соблюдение правил эксплуатации электроустановок является обязанностью электротехнического персонала, к которому относится дежурно-ремонтный персонал. Функциональные обязанности этого персонала и требования к нему нормативно установлены применительно к занимаемой должности или

к профессии в соответствии с присвоенной группой по электрической безопасности:

III группа – при работе на ЭУ напряжением $U < 1000\text{В}$.

IV группа – при работе на ЭУ напряжением $U > 1000\text{В}$.

V группа – административно-технический персонал, руководители и специалисты, которые несут полную ответственность за производственную безопасность оборудования напряжением до и выше 1000В.

Для электротехнического персонала, обслуживающего конкретные электроустановки (операторы, машинисты, обходчики и др.), разрабатываются и утверждаются главным инженером (главным энергетиком) предприятия эксплуатационные инструкции, в которых указываются последовательность операции пуска и остановки оборудования и меры, принимаемые при возникновении аварий, порядок допуска к ремонту оборудования и другие меры безопасности:

– При эксплуатации всех видов электроустановок необходимо следить, чтобы воздух в помещении не был чрезмерно влажным, запыленным и загазованным. Влага и пыль проникают в оболочку электроустановок и могут стать причиной короткого замыкания. Чистку электрооборудования проводят в сроки, указанные в инструкциях завода-изготовителя.

– Не допускается эксплуатация электрооборудования с отбитыми или смятыми краями фланцев во взрывонепроницаемых установках или незакрепленными болтовыми соединениями, а также при наличии трещин, проколов или прожогов.

– Все электрические установки в производственных помещениях II и III классов по электрической опасности независимо от питающего напряжения должны быть стационарно заземлены. Надежность работы защитного заземления во многом зависит от правильности его выполнения. Перед проверкой состояния заземляющих устройств необходимо провести осмотр электроустановки. У силовых трансформаторов в сетях с изолированной нейтралью проверяется наличие стационарных пробивных предохранителей. В четырех- и пятипроводных сетях переменного тока напряжением до 1000В проверяется наличие заземленной нейтрали. В системе защитного заземления проверяются болтовые и сварные соединения, конструкции, материалы и размеры электродов, расстояния между ними, глубина заложения заземляющих проводников в земле, связь между искусственными и естественными заземлителями (трубопроводы, кроме труб с углеводородными продуктами, металлоконструкции зданий, стальные опоры воздушных линий электропередач и др.).

– Осмотр оборудования с дистанционным управлением и выведенного в ремонт оборудования должен проводиться оперативно-эксплуатационным персоналом не реже одного раза в час.

– Выведенное в ремонт, но не заземленное электрооборудование считается находящимся под напряжением.

Для обеспечения безопасных условий проведения ремонтных работ на электроустановках необходимо выполнение ряда организационных и технических мероприятий.

– К организационным мероприятиям относятся: оформление наряда-допуска к работам с записью в журнале или устное распоряжение; непосредственный допуск к работам, надзор во время работы, оформление перерывов в работе, перевод на другое рабочее место, окончание работ, опробование оборудования после ремонта и закрытие наряда-допуска.

– К техническим мероприятиям при частичном или полном снятии напряжений относятся: отключение электрической установки со всех сторон возможной подачи напряжения; запираание на замок включающих аппаратов, вывешивание на них предупредительных плакатов «Не включать» и постановка временных ограничений рабочего места от действующего оборудования; проверка отсутствия напряжения на установке, выведенной в ремонт; наложение переносного заземления и вывешивание плаката «Работать здесь». Технические мероприятия выполняются допускающим к работе должностным лицом в полном соответствии с указаниями и в последовательности, предусмотренной правилами [9].

ГЛАВА 2

ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

2.1. ВЗРЫВООПАСНЫЕ ЗОНЫ. СВЕДЕНИЯ О ВЗРЫВООПАСНЫХ СМЕСЯХ И ВЕЩЕСТВАХ

В нефтехимической, нефтеперерабатывающей, электротехнической, теплоэнергетической, чёрной и цветной металлургии и в ряде других отраслей промышленности имеется много установок, в которых используются, перерабатываются или хранятся различные горючие вещества: горючие газы, легковоспламеняющиеся жидкости, которые, попадая в окружающую среду, могут образовывать взрывоопасные смеси.

Пространство – объём среды, окружающей электроустановку внутри помещения или вокруг наружных установок, в которой имеются или могут образовываться взрывоопасные смеси, называется, согласно «Правилам устройства электроустановок» (ПУЭ), *взрывоопасной зоной*.

Электрооборудование и электрические сети во взрывоопасных зонах создают опасность поджигания или возникновения тлеющих разрядов, при недопустимом перегреве оборудования и сетей. Поэтому необходимо ограничивать размещение во взрывоопасных зонах электрооборудования и электрических сетей. Когда такого рода размещения по обоснованным причинам (технологическим, конструктивным, экономическим) избежать нельзя, то во взрывоопасных зонах следует использовать специальное взрывозащищённое электрооборудование, снабжённое средствами взрывозащиты.

Электрические сети во взрывоопасных зонах должны выполняться, согласно специальным требованиям к выбору жил проводников, марок кабелей и изоляции [9].

Взрывоопасными, согласно ПУЭ, являются смеси горючих газов, паров легковоспламеняющихся жидкостей, а также горючих пылей и волокон во взвешенном состоянии с воздухом, кислородом или другим окислителем, например, хлором.

Легковоспламеняющейся жидкостью считается горючая жидкость с температурой вспышки, не превышающей 61°С, с давлением паров при температуре 20°С менее 0,1 МПа.

Горючие жидкости с температурой вспышки выше 61°С относятся к пожароопасным, но нагретые в условиях производства до температуры вспышки или выше являются взрывоопасными.

По плотности по отношению к воздуху при температуре среды 20°С и давлении 0,1 МПа различают газы: лёгкие – с плотностью менее 0,8 и тяжёлые – с плотностью равной или более $0,8 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Газы, обращённые в жидкость при температуре среды ниже 20 °С или давлении выше 0,1 МПа или при совместном действии этих факторов, называются *сжиженными*.

Воспламенение горючих смесей и распространение пламени зависит от концентрации горючего вещества в газо-паро- или пылевоздушной смеси, при которой возможны воспламенение, распространение пламени и взрыв смеси.

Различают верхний и нижний концентрационные пределы воспламенения. Нижний предел концентрации – это такое содержание горючего газа или паров ЛВЖ (в процентах по объёму) в газопаровоздушной смеси, ниже которого, при любом меньшем содержании горючего вещества, в смеси с воздухом воспламенения не происходит, но выше которого произойдёт воспламенение с взрывом.

Верхний предел концентрации соответствует наибольшему содержанию горючего вещества, выше которого его смеси с воздухом не воспламеняются.

Взрывоопасные смеси подразделяются на категории и группы по возрастающей степени их опасности (табл. 2.1, 2.2).

Таблица 2.1

Категории взрывоопасных смесей газов и паров ЛВЖ с воздухом

Категории взрывоопасных смесей	Наименование смеси	БЭМЗ, мм*
I	Рудничный газ-метан (подземные условия)	Более 1,0
II	Промышленные газы и пары (наземные условия)	
IIА	Промышленные газы и пары (наземные условия)	Более 0,9
IIВ	Промышленные газы и пары (наземные условия)	От 0,5 до 0,9
IIС	Промышленные газы и пары (наземные условия)	До 0,5

*) Указанные значения безопасного экспериментального максимального зазора не являются конкретной величиной щелевого зазора во фланцах оболочки корпуса взрывозащищённого оборудования. Конкретная величина зазора устанавливается при определении уровня и вида взрывозащиты ЭУ.

Группа взрывоопасной смеси Т1-Т6 определяется в зависимости от температуры воспламенения [5, с. 6].

Таблица 2.2

Группы взрывоопасных смесей газов и паров ЛВЖ с воздухом

Группа	Температура самовоспламенения, °С	Группа	Температура самовоспламенения, °С
T1	Выше 450	T4	От 135 до 200
T2	От 300 до 450	T5	От 100 до 135
T3	От 200 до 300	T6	От 85 до 100

Физические свойства и постоянные некоторых веществ представлены в табл. 2.3, 2.4.

Таблица 2.3

Физические свойства взрывоопасных веществ

№ п/п	Наименование взрывчатых веществ	Состояние вещества при обычных условиях	Плотность в гр./см ³ (для жидкости)	Плотность по отношению к воздуху (для газов и паров)	Температура в °С		Пределы взрываемости в %, объемные		Категория, группа взрывоопасной смеси по ГОСТ 12.1.011-76
					вспышки	самовоспламенения	нижний	верхний	
1	Аммиак	газ	0,77	0,6	-	651	15	25	ПА,Т ₁
2	Ацетон	лвж	0,79	2	-18	538	3	10,8	ПА,Т ₁
3	Ацетилен	газ	1,17	0,9	-	305	2,4	78	ПС,Т ₂
4	Бензол	лвж	0,88	2,7	-11	555	1,4	6,7	ПА,Т ₁
5	Бутан	газ	0,6	2	-60	365	1,9	9,1	ПА,Т ₂
6	Бензин	лвж	0,69	2,8	-58	175	1,2	7	ПА,Т ₄
7	Водород	газ	-	0,07	-	510	4,1	74,5	ПС,Т ₁
8	Кислота уксусная	лвж	1,05	2,1	118	550	4,1	17	ПА,Т ₁
9	Метан промышленный	газ	0,71	0,6	-	556	5,2	14	ПА,Т ₁
10	Окись углерода	газ	1,25	0,91	-	609	12,5	74	ПА,Т ₁
11	Пропилен	газ	0,58	1,5	-	455	2	11,1	ПА,Т ₂
12	Сероуглерод	лвж	1,26	2,6	-30	107	1	50	ПС,Т ₅
13	Сероводород	газ	1,57	1,2	-	260	4,3	45,5	ПВ,Т ₃
14	Спирт бутиловый	лвж	0,82	2,5	28	364	1,9	7,3	ПА,Т ₂
15	Спирт метиловый	лвж	0,79	1,1	16	461	6,7	36,5	ПА,Т ₁
16	Спирт этиловый	лвж	0,79	1,6	13	462	3,3	18,9	ПА,Т ₁
17	Уайт-спирит	лвж	0,79	-	-33	270	1,4	6	ПА,Т ₃
18	Хлорбензол	лвж	1,11	3,9	-28	590	1,3	7,8	ПА,Т ₁
19	Этилен	газ	0,61	0,97	-	540	3	31,5	ПВ,Т ₁
20	Этил хлористый	лвж	0,92	2,2	-43	494	3,6	15,4	ПА,Т ₁

Таблица 2.4

Физические постоянные некоторых газов

Газ	Химическая формула	Молекулярная масса М, кг/кмоль	Газовая постоянная R, Дж/кг*К	Плотность газа, t=0°, ρ, кг/м ³
Кислород	O ₂	32	259,8	1,429
Водород	H ₂	2,016	4124,8	0,09
Азот	N	28,02	296,8	1,25
Окись углерода	CO	28	296,8	1,25
Воздух	-	28,96	287,0	1,293
Углекислый газ	CO ₂	44	189,0	1,977
Водяной пар	H ₂ O	18,016	461,6	0,804
Гелий	He	4,003	2077,2	0,178
Аргон	Ar	39,944	208,2	1,784
Аммиак	NH ₃	17,031	488,2	0,771

Категория взрывоопасной смеси определяется по величине так называемого безопасного экспериментального максимального зазора (БЭМЗ) между фланцами в оболочке корпуса электрической установки, через который при испытаниях не проходит передача в окружающую среду энергии взрыва, инициированного внутри оболочки. Одновременно при этом снижается энергия: давление и температура взрыва в самом корпусе электрической установки. Энергия взрыва гасится внутри щелевого зазора за счёт теплопередачи через стенки фланцев в оболочке корпуса в окружающую среду:

$R_m = 8314$ – универсальная газовая постоянная для всех газов, для одного киломоля, $\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль}\cdot\text{К}}$;

$R = \frac{R_m}{M} = \frac{8314}{M}$ – газовая постоянная, то есть теплоёмкость для конкретного газа, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$;

M – масса одного киломоля, $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$;

$M = V \cdot \rho$, $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$ – молекулярная масса;

$V = 22,4 \frac{\text{м}^3}{\text{кмоль}}$ – объем одного киломоля.

2.2. ВЫБОР И ЗАЩИТА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ВО ВЗРЫВООПАСНЫХ ЗОНАХ

Электрическое оборудование (ЭО), которое устанавливается в помещениях с взрывоопасной средой и в котором возможно возникновение искр и электрических дуг (электрические машины, трансформаторы,

выключатели, разъединители, пускорегулирующая аппаратура и другие устройства), должно выполняться во взрывозащищённом исполнении и устанавливается в зонах с соответствующими категориями взрывоопасных смесей [16, с. 340].

Взрывозащищённое электрооборудование, согласно ГОСТ 12.2.020-76, подразделяется на температурные классы, уровни, виды взрывозащиты и группы применения (I,II).

Температура поверхности ЭО на всех режимах работы должна быть ниже на 20-25 °С температуры самовоспламенения взрывоопасной среды в помещении. В зависимости от максимально-предельной температуры поверхности, которая может соприкоснуться с внешней взрывоопасной средой, взрывозащищённое электрооборудование делится на шесть температурных классов:

$T_1=450\text{ °С}; T_2=300\text{ °С}; T_3=200\text{ °С};$

$T_4=135\text{ °С}; T_5=100\text{ °С}; T_6=85\text{ °С}.$

Взрывозащищённое электрооборудование выпускается трёх уровней взрывозащиты.

Таблица 2.5

Условное обозначение уровней взрывозащиты.

Уровни взрывозащиты	По ПИВРЭ *	По ГОСТ 12.2.020-76
Повышенной надёжности	Н	2
Взрывобезопасный	В	1
Особо взрывобезопасный	О	0

*) ПИВРЭ – Правила изготовления взрывозащищённого рудничного электрооборудования.

ГОСТ 12.020-76 ССБТ «Взрывозащищённое электрооборудование».

- Электрооборудование повышенной надёжности (*Н*; 2) против взрыва имеет защиту только в нормальном режиме работы, используется в местах, где опасная среда отсутствует, но может появиться кратковременно при авариях.
- Взрывобезопасное ЭО (*В*; 1) применяется в местах, где взрывоопасная среда появляется при нормальном режиме работы и при авариях.
- Особо взрывоопасное ЭО (*О*; 0) используется в местах, где постоянно и длительно может присутствовать взрывоопасная среда. В таком оборудовании принимаются дополнительные средства взрывозащиты по отношению к взрывобезопасному оборудованию.

Условные обозначения видов виброзащиты представлены в табл. 2.6.

Условное обозначение видов взрывозащиты

№ п/п	Виды взрывозащиты	По ПИВРЭ	По ГОСТ 12.2.020-76
1	Взрывонепроницаемая оболочка	В	d
2	Искробезопасная электрическая цепь	И	i
3	Вид защиты «е» повышенная надёжность	Н	e
4	Масляное заполнение	М	o
5	Кварцевое заполнение	К	q
6	Продувка под избыточным давлением	П	p
7	Специальный вид	С	s

При изготовлении взрывозащищённого электрооборудования применяются следующие виды взрывозащиты.

- Взрывонепроницаемая оболочка (*В; d*) выдерживает давление взрыва и предотвращает распространение взрыва изнутри оболочки в окружающую взрывоопасную среду.

Защита достигается за счёт высокой механической прочности оболочки и наличия зазора в длинной узкой щели во фланцевом соединении, через которую не происходит передача энергии взрыва из оболочки в окружающую среду.

Величина зазора δ , мм устанавливается в зависимости от категории взрывоопасной смеси: категория I – $\delta > 1$ мм; категория IIА – $\delta = 0,65-1$ мм; категория IIВ – $\delta = 0,35-0,65$ мм; категория IIС – $\delta < 0,35$ мм.

Зазор необходим для снижения давления взрыва внутри оболочки, а также для того, чтобы выходящая из узкой щели смесь с пониженным давлением и температурой не смогла воспламенить окружающую взрывоопасную смесь в помещении. Чем меньше зазор, тем опаснее смесь.

- Электрооборудование в искробезопасном исполнении (*И; i*) (ГОСТ 22.782.5-78) применяется главным образом в аппаратах управления, автоматики, сигнализации и связи с малыми напряжениями и токами с искрогасящими устройствами, предотвращающими воспламенение окружающей среды при возможных повреждениях (коротких замыканий, ухудшения изоляции и др.). Примеры маркировки взрывозащищённого оборудования представлены в табл. 2.7.
- Вид защиты «е» (*Н; e*) заключается в создании повышенной надёжности ЭО против взрыва и в обеспечении безопасности при обслуживании ЭУ. Повышенная надёжность при эксплуатации обеспечивается за счёт принятия особых мер, не допускающих коротких замыканий, переходных сопротивлений, образование искр и наличия защиты от внешних воздействий не ниже IP54. Вид защиты «е» предусматривает защиту, действующую на отключение повреждённой установки (зануление, защитное отключение, предохранители и др.).

- В маслонаполненном взрывозащищённом ЭО ($M; o$) все части, находящиеся под напряжением, погружаются в электроизоляционное трансформаторное масло для исключения возможного соприкосновения между этими частями и взрывоопасной окружающей средой.
- Кварцевое заполнение ($K; p$) оболочек электрооборудования применяется с аналогичными целями в аппаратах с большими токами и напряжениями с высокоциклической нагрузкой (выключатели, разъединители, отделители и др.). Такие аппараты имеют электрическую защиту на отключение и заполняются сухим песком.
- Продувка под избыточным давлением ($L; q$), как правило осуществляется на электрических машинах большой мощности (более 300 кВт) подачей чистого атмосферного воздуха специальным вентилятором для предотвращения попадания взрывоопасной смеси внутрь корпуса электрической установки.
- Специальный вид защиты ($C; s$) взрывозащищённого ЭО осуществляется подачей в корпус установки инертного газа, заполнением песком или заливкой эпоксидной смолой, а также может выполняться по специально разработанной методике с учётом местных условий.

Взрывозащищённое электрооборудование по месту использования разделяется на две группы:

- группа I – применяется в рудничном производстве для работ в подземных шахтах.
- группа II – используется в наружных и внутренних электроустановках во взрывоопасных зонах наземных установках.

Таблица 2.7

Примеры маркировки взрывозащищённого электрооборудования

Уровень взрывозащиты	Вид взрывозащиты	По ГОСТ 12.2.020-79
Повышенная надёжность	Вид защиты «е» Искробезопасная электрическая цепь	2 E _x eiIIcT3
Взрывобезопасный	Взрывонепроницаемая оболочка	1E _x dIIBT4
Особо взрывобезопасный	Искробезопасная электрическая цепь	0E _x iIIAT5

Пояснение маркировок

Марка 2 E_xeiIIcT3: 2 – уровень взрывозащиты – повышенная надёжность; E_x – взрывозащитное оборудование; e – вид защиты «e», защита от коротких замыканий, перегрузок и др.; i – искрогашение; II – наземная установка; c – щелевая защита – зазор $\delta < 0,35$ мм; T3 – температурный класс 3 – $t_{\text{п}}^{\text{max}} = 200$ °C.

Марка 1E_xdIIBT4: 1 - уровень взрывозащиты – взрывобезопасный; d – взрывонепроницаемая оболочка; B - щелевая защита – $\delta = 0,65$ мм; T4 - температурный класс 4 – $t_{\text{п}}^{\text{max}} = 135$ °C.

Марка 0E_xiIIAT5: 0 – уровень особовзрывобезопасный; A - щелевая защита – $\delta = 1$ мм; T5 - температурный класс 5 – $t_{\text{п}}^{\text{max}} = 100$ °C.

2.3. ИСТОЧНИКИ СВЕТА В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

При освещении производственных помещений и рабочих мест, кроме естественного света, образуемого солнечными лучами и рассеянным светом небосвода, используют искусственное освещение, создаваемое электрическими источниками света, и совмещенное освещение, при котором недостаточное по нормам естественное освещение дополняют искусственным.

Электрические источники света (ИС) излучают электромагнитные волны видимого спектра для глаза человека в диапазоне длин от 380 до 770 нм, и делятся по способу генерирования ими оптического излучения на тепловые и люминесцентные. Первую группу составляют лампы накаливания (тепловое излучение вольфрамовой нити), вторую – газоразрядные лампы (ГРЛ) (излучение в результате электрического разряда в парах инертных газов – аргона и ртути).

Основными параметрами электрических источников света являются: номинальная мощность P , Вт; светоотдача V , измеряемая числом люменов на 1 Вт ($\frac{\text{лм}}{\text{Вт}}$), напряжение питающей сети на лампе, номинальный световой поток F , лм и срок службы τ , ч. Все эти параметры регламентируются соответствующими ГОСТ и ТУ:

– *Лампы накаливания (ЛН)*

Для целей освещения широкое распространение получили лампы накаливания общего назначения (ГОСТ 2239-79). Это объясняется простотой их устройства и эксплуатации. Для уменьшения интенсивности процесса окисления и распыления вольфрамовой спирали лампы выполняют либо вакуумными (тип В от 15 до 25 Вт), либо заполненными инертным газом – аргоном, криптоном и др. (типа Г, Б, БК от 40 до 1500 Вт). Для местного освещения применяются специальные ЛН на пониженные напряжения 12, 24 и 36В (типы МО 12-51, МО 24-25 и МО 36-25). Преимущества ЛН: простота устройства, отсутствие вспомогательных элементов; отсутствие пульсации и шума. Существенный недостаток ламп накаливания – это отличие спектра в создаваемом им свете от дневного, а именно отсутствие зеленой полосы, необходимой для нормального состояния зрачка глаза человека. В спектре света, излучаемого лампами накаливания, присутствуют длинноволновые цвета – красные и желтые. Недостатком ЛН также являются низкая фактическая светоотдача ($25 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}$) по сравнению с теоретически возможной световой отдачей вольфрама ($50 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}$) и малый срок службы (до 1000 часов).

В целях безопасного обслуживания ламп накаливания при их замене или ремонте цоколя выключатель SA в схеме электропитания следует устанавливать на фазном проводнике L 220 В, подсоединив его к

дальнему электроду в цоколе. Установка выключателя на нулевом рабочем проводнике N запрещается.

Обращаться с лампами накаливания, равно как и с другими электрическими источниками света, необходимо с особой осторожностью как с хрупкими электропожароопасными изделиями.

- *Газоразрядные лампы низкого давления.* Трубчатые люминесцентные лампы низкого давления (ЛЛ) (давление в колбе 3 – 5 кПа) широко применяются для освещения общественных, жилых зданий и промышленных предприятий.

Люминесцентные лампы светятся в результате электрического разряда в газовой среде. Непосредственное световое излучение трубки очень мало, но электрический разряд в ртутных парах является источником интенсивного ультрафиолетового излучения (невидимого для глаза человека), которое при помощи люминофора, которым покрыта внутренняя поверхность колбы, преобразуется в видимый свет.

Преимуществами газоразрядных ламп по сравнению с лампами накаливания являются: а) широкий световой спектр (наличие зеленой полосы), который может регулироваться в зависимости от назначения и места установки (лампы ЛБ, ЛТБ, ЛД и КЛW), применяются для правильной цветопередачи предметов и человеческого лица; б) большая световая отдача ($80 \div 120 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}$); в) большой срок службы. Средняя продолжительность горения всех типов ГРЛ должна быть не менее 12000 ч.

К недостаткам газоразрядных ламп относятся:

- а) невозможность работы ламп на постоянном токе;
- б) снижение надежности работы ГРЛ при изменении сетевого напряжения на величину $\pm 20\%$ от U фазного;
- в) не гарантируется зажигание лампы при температуре окружающего воздуха $t < 10^\circ\text{C}$;
- г) пульсация светового потока частотой 100 Гц при переменном токе 50 Гц;
- д) возможность образования стробоскопического эффекта при наличии вращающихся механизмов в помещении;
- е) трудность утилизации отработавших ГРЛ;
- ж) наличие пускорегулирующей аппаратуры, сложность монтажа и ремонта;
- з) возникновение шума при появлении дефектов в дросселе.

Существует несколько схем включения трубчатых люминесцентных ламп низкого давления. Самая простая и наиболее часто используемая – схема со стартерным пуском, показана на рис. 2.1.

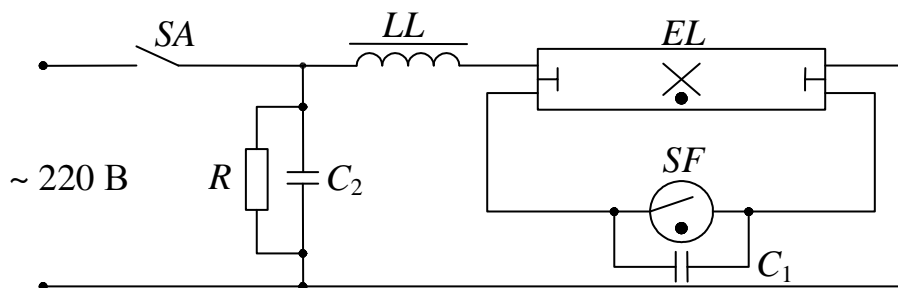


Рис. 2.1. Схема включения газоразрядной лампы низкого давления:
 SA – выключатель; LL – дроссель; EL – люминесцентная лампа низкого давления X ;
 SF – стартер; C_1 , C_2 – конденсаторы; R – разрядный резистор

При включении лампы выключателем SA под влиянием напряжения между электродами статора SSF возникает тлеющий разряд, что приводит к их разогреву. Биметаллический электрод изгибается и касается другого электрода. Пока электроды соприкасаются, через спирали в колбе лампы проходит сильный ток, нагревающий их до температуры $1000\text{ }^\circ\text{C}$. Возникает термоэлектронная эмиссия и газ ионизируется (заряжается положительными и отрицательными ионами). В это время биметаллический электрод стартера охлаждается, возвращается на прежнее место и разрывает цепь. В тот же момент в лампе возникает электрический разряд и она начинает светиться. Дроссель LL выполняет роль балластного индуктивного сопротивления и способствует возникновению электрического разряда, повышая напряжение в лампе в момент зажигания. После чего напряжение за дросселем при горении лампы становится примерно вдвое ниже напряжения сети. Конденсатор стартера C_1 служит для уменьшения радиопомех в транслирующих системах. Конденсатор C_2 предназначен для компенсации реактивной мощности от индуктивной нагрузки дросселя, т.е. для повышения коэффициента мощности $\cos\phi$. Разрядный резистор R установлен параллельно емкости C_2 с целью защиты персонала от поражения током в случае разрядки компенсирующего конденсатора в период ремонтных работ с отключением лампы от сети.

- *Газоразрядные лампы высокого давления.* Наряду с трубчатыми ГРЛ низкого давления широкое применение нашли ртутно-дуговые люминесцентные лампы высокого давления типа ДРЛ (давление газа в колбе 10-20 кПа). Мощность ламп типа ДРЛ от 80 до 2000 Вт. Области применения ртутно-дуговых ламп там, где требуется освещение больших площадей: наружное освещение территорий и производственных помещений промышленных предприятий. Лампы ДРЛ состоят из кварцевой разрядной трубки, помещенной в стеклянный баллон эллипсоидной формы. На внутренней поверхности баллона нанесен слой люминофора. Видимое излучение ртутного разряда проходит через слой люминофора и состоит из ультрафиолетового, синего и зеленого спектров. Область красного спектра в излучении ДРЛ почти полностью отсутствует.

Наиболее современными источниками света для общего освещения больших территорий являются лампы типа ДРИ (дуговая ртутная с иодными добавками), а также натриевые лампы типа ДНаТ, которые обеспечивают высокую световую отдачу до $100-130 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}$. Однако эти лампы неудовлетворительны по цветопередаче, так как в их спектре преобладает желтое излучение. Они могут применяться в тех случаях, когда не требуется различать цветность объекта освещения (автостреды, тоннели товарные станции и т.д.). Схема включения газоразрядных ламп высокого давления типа ДРЛ показана на рис. 2.2.

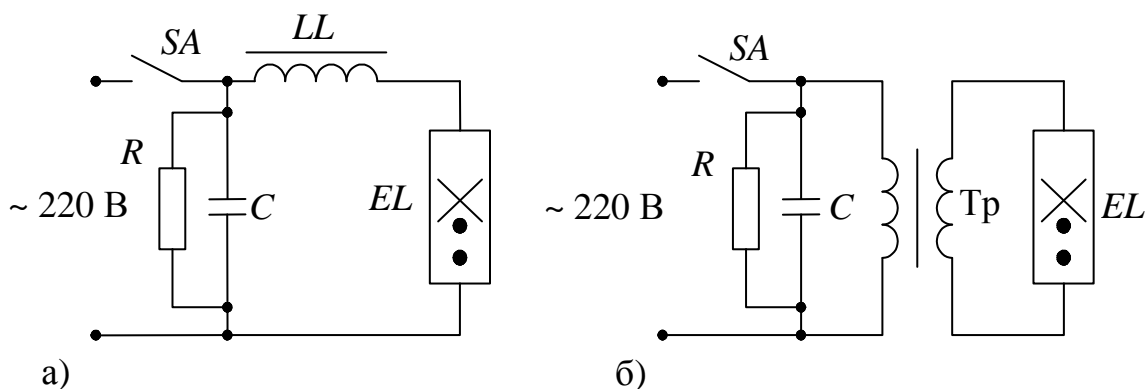


Рис. 2.2. Схемы включения газоразрядных ламп типа ДРЛ:
а - ДРЛ с дросселем *LL*; *б* - ДРЛ с трансформатором *Tr*, имеющим большое магнитное рассеивание; *EL* – газоразрядная лампа высокого давления Х••; *C* – компенсирующая емкость; *R* – разрядный резистор; *SA* – выключатель

Газоразрядные лампы типа ДРЛ имеют ряд преимуществ:

- а) высокая световая отдача до $80 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}$;
- б) компактность, при высокой единичной мощности (до 2000 Вт);
- в) способность работать при отрицательной температуре;
- г) длительный срок службы (до 15000 ч);
- д) видимое излучение состоит из ультрафиолетового, синего и зеленого спектров;

Недостатками ламп типа ДРЛ являются:

- а) низкая цветопередача;
- б) возможность работы только на ~ токе;
- в) длительность включения и разгорания (до 7 мин);
- г) необходимость полного остывания для повторного включения и разгорания лампы;
- д) пульсации светового потока и возможность образования стробоскопического эффекта (совпадение частот пульсации лампы с частотой вращения механизма, при котором происходит зрительное искажение процесса вращения).

Для устранения возникновения стробоскопического эффекта наиболее распространенным способом является подсоединение светильников ГРЛ к разным фазным проводникам L_1, L_2, L_3 в трехфазной четырехпроводной сети, как показано на рис. 2.3. [16]

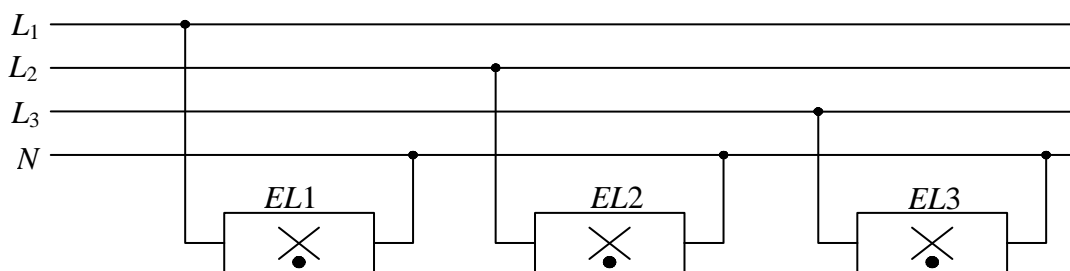


Рис. 2.3. Схема подключения газоразрядных ламп к сети:
 $EL1,2,3$ – группы светильников с ГРЛ; L_1, L_2, L_3 – фазные проводники;
 N – нулевой рабочий проводник

ГЛАВА 3

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД. БЕЗОПАСНОСТЬ ОБСЛУЖИВАНИЯ

Из всех видов, применяемых в промышленности приводов, электрический привод получил наибольшее распространение. В настоящее время все механические работы в технике выполняют электрические двигатели. Электрическими двигателями потребляется более 60% всей вырабатываемой электроэнергии. Такое массовое использование электрических двигателей объясняется их высоким КПД, быстрым включением, простотой управления и надёжностью в работе.

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрическим приводом называют электромеханическую систему, состоящую из электрического двигателя, передаточного (редуктора) и управляющего устройства, предназначенного для приведения в движение исполнительного механизма (насоса, вентилятора, компрессора и др.) и управление этим движением.

Впервые в России трехфазная система электроснабжения и асинхронные двигатели были внедрены в производство в 1893 г. на Новороссийском зерновом элеваторе.

В технике всегда существуют противоречия между стремлением создать «идеальную» конструкцию и невозможностью реализации этого. Поэтому представляет интерес противоречий в развитии конструкции электропривода.

Так, асинхронный двигатель в короткий срок занял доминирующее положение в системе электропривода. Он заменил паровую машину и дизель с их низкими технико-экономическими показателями. Однако тип привода остался централизованным, т.е. с передачей энергии через систему трансмиссий. Одним из недостатков такого привода была необходимость постоянного вращения всех трансмиссий, несмотря на то, что часть машин работала циклично.

Несмотря на ряд противоречий в развитии конструкций электропривода, в последующие годы почти все виды электропривода уступили место индивидуальному. Доминирующую роль в этом сыграл социальный фактор.

Для обеспечения лучших условий труда требовались более светлые чистые помещения. Жизнь требовала снижения вибрации, уровня шума, улучшения условий техники безопасности при эксплуатации электрооборудования. Возникла необходимость в более удобном и гибком управлении рабочими машинами. Всеми этими требованиями удовлетворял

индивидуальный привод. С развитием автоматизации одиночный привод уступает место многодвигательному, когда каждый рабочий орган приводится в движение отдельным двигателем. Вместе с увеличением первоначальных затрат и усложнением эксплуатации, многодвигательный привод является более прогрессивным. Он существенно упрощает передачи, позволяет осуществлять электрические блокировки, исключает возможность появления опасных режимов работы оборудования. В результате повышается безопасность обслуживания установок.

Таким образом, из истории развития электропривода вытекает, что его совершенствование определялось не только технико-экономическими, но и социальными факторами. Последние, как известно, оказывают существенное влияние на повышение производительности труда и снижение травматизма на производстве.

На рис. 3.1 представлены механические характеристики электроприводов. Пригодность двигателя для привода рабочей машины определяется совместимостью их механических характеристик. Механической характеристикой называется зависимость $\omega = f(M)$ или $n = f(M)$, где ω – угловая частота вращения, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}, \frac{1}{\text{с}}$; n – оборотная частота вращения, об/м; M – вращающий момент, Н·м; $\omega = 2\pi f$ или $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \frac{1}{\text{с}}$, Гц.

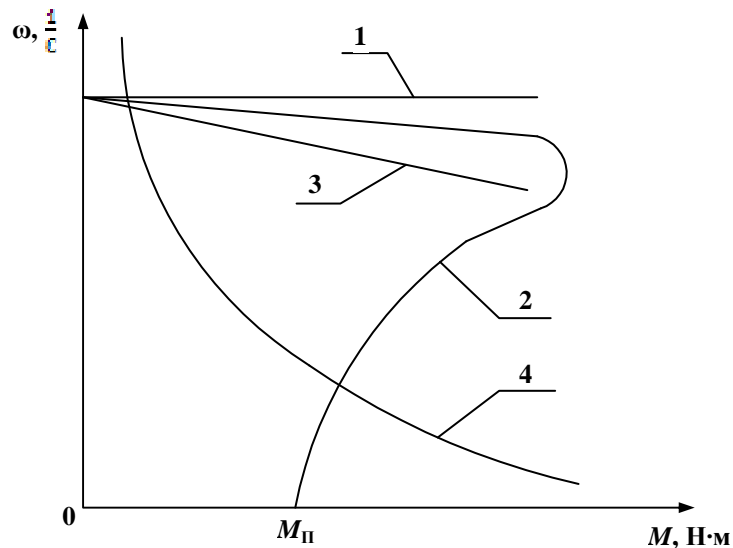


Рис. 3.1. Механические характеристики электродвигателей:

1 – синхронный двигатель; 2 – асинхронный двигатель; 3 – двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением; 4 – двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением; $M_{П}$ – пусковой момент

Из рисунка видно, что с увеличением вращающего момента частота вращения двигателей (кроме синхронного) уменьшается.

На рис. 3.2 представлены механические характеристики производственных механизмов $\omega = f(M_c)$, где M_c – момент сопротивления.

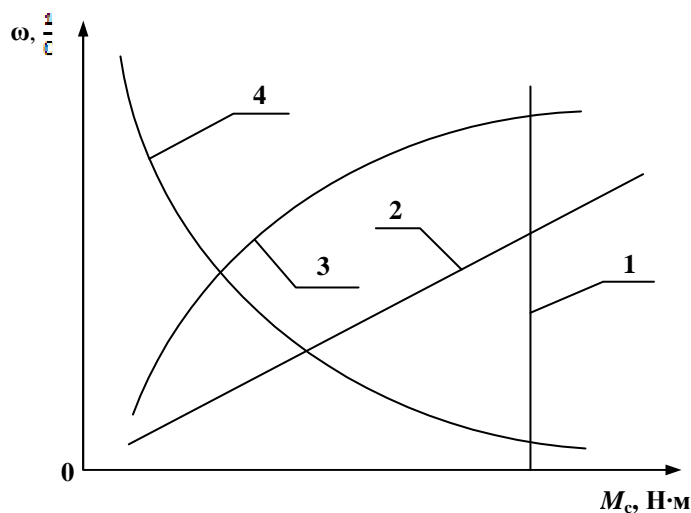


Рис. 3.2. Механические характеристики производственных механизмов:

1 – механизм подъема мостового крана; 2 – привод электрического генератора с независимым возбуждением; 3 – центробежный вентилятор; 4 – металлорежущий станок

3.2. НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ

Правильный выбор двигателя имеет важное значение для надежной и экономичной работы электропривода. При заниженной мощности двигатель не обеспечивает требуемой производительности оборудования. Его нагрев может превышать допустимые значения, что приводит к быстрому разрушению изоляции обмоток, возникновению аварий и восстановительных ремонтов. Использование двигателя завышенной мощности приводит к снижению КПД и коэффициента мощности ($\cos\phi$), к увеличению стоимости электрооборудования и эксплуатационных расходов. При любом режиме работы электропривода максимальная температура нагрева двигателя t_{\max} не должна превышать допустимых значений $t_{\text{доп}}$ для данного класса изоляции. Наиболее распространены следующие классы изоляции:

- класс *A* – хлопчатобумажное волокно, шелк, электрокардон, древесина, пропитанные лаками, смолами и эмали ($t_{\text{доп}} = 105^{\circ}\text{C}$);
- класс *B* – стекловолокно, асбест, стеклоткань, миканит, пропитанные битумом, синтетическими и эпоксидными смолами ($t_{\text{доп}} = 130^{\circ}\text{C}$);
- класс *H* – характерны те же материалы, что и для класса *B*, в сочетании с кремне-органическими связующими и пропиточными материалами ($t_{\text{доп}} = 180^{\circ}\text{C}$).

Допустимые температуры нагрева приняты из расчёта срока службы изоляции не менее 15-20 лет. Превышение температуры изоляции сверх допустимых значений на каждые 8-10 $^{\circ}\text{C}$ сокращает срок службы двигателя

примерно в два раза. При температуре двигателя $t = 1,5 \cdot t_{\text{доп}}$ изоляция разрушается за несколько дней, а при $t = 2 \cdot t_{\text{доп}}$ – за несколько часов. Если температура двигателя во время работы ниже допустимой, то это означает, что его мощность недоиспользуется, а масса и габариты завышены. Более интенсивная вентиляция продлевает срок службы электрооборудования.

Расчётную температуру окружающей среды принимают равной $t_0 = 40^\circ\text{C}$. Номинальная мощность двигателя $P_{\text{ном}}$, указанная в паспорте, – это полезная (активная) механическая мощность двигателя, соответствующая номинальному режиму работы при стандартной температуре окружающей среды.

3.3. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА

Из всего многообразия режимов работы электроприводов основными являются три: длительный (S_1), кратковременный (S_2) и повторно кратковременный (S_3):

- *Длительным*, или продолжительным, режимом называется режим, при котором температура всех устройств, входящих в состав электропривода, достигает установившегося значения. В длительном режиме обычно работают двигатели вентиляторов, сетевых и питательных насосов, компрессоров, трансформаторов и др.
- *Кратковременным* режимом называется режим работы электропривода такой длительности, при которой температура всех устройств, входящих в состав электропривода, не достигает установившегося значения во время работы и снижается до температуры окружающей среды во время паузы. В кратковременном режиме работают двигатели задвижек трубопроводов, шлюзовых и поворотных затворов, некоторых мешалок и отдельных элементов металлорежущих станков.
- *Повторно – кратковременный* режим отличается от кратковременного режима тем, что время отключения τ_0 меньше 3-4 мин недостаточно для охлаждения двигателя до температуры t_0 . В таком режиме обычно работают электроприводы грузоподъёмных механизмов со знакопеременной нагрузкой мостовых, башенных кранов и других подобных механизмов.

Основной характеристикой повторно - кратковременного режима является продолжительность включения (ПВ), в процентах:

$$\text{ПВ} = \frac{\tau_p}{\tau_p + \tau_0} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

где τ_p – время работы электропривода, мин;

τ_0 – время отключения (охлаждения), мин.

Тогда

$$ПВ = \frac{\tau_p}{\tau_{ц}} \cdot 100\%, \quad (3.2)$$

где $\tau_{ц} = \tau_p + \tau_0$ – время рабочего цикла, мин.

Продолжительность включения ПВ учитывает длительность рабочего цикла и определяет тепловую нагрузку электропривода. Длительность рабочего цикла электропривода устанавливается заводом-изготовителем. ГОСТом определены четыре стандартных значения ПВ: 15, 25, 40 и 60% при рабочем цикле длительностью 10 мин. Если продолжительность цикла более 10 мин и продолжительность включения ПВ > 60%, режим работы электропривода считается длительным. Отсюда следует, что выбор электропривода должен проводиться с учётом реальных условий эксплуатации: режима работы, продолжительности включения (ПВ) и длительности рабочего цикла электрического двигателя ($\tau_{ц}$).

3.4. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Основными требованиями безопасности при эксплуатации и ремонте электродвигателей являются:

- На вновь установленном двигателе необходимо проверить соответствие его напряжения напряжению сети. Статор двигателя испытывают повышенным напряжением $U_{исп} = 1,5 \cdot U_{л}$. Проверяют крепление электродвигателя на установленной раме или плите;
- Двигатели, длительное время находившиеся в резерве, должны быть постоянно готовы к немедленному пуску, для чего их следует периодически осматривать и опробовать по графику, утвержденному главным инженером предприятия;
- Необходимо вести постоянный надзор за нагрузкой электродвигателей и температурой и вибрацией их подшипников. Предельная допустимая температура подшипников не должна превышать для подшипников скольжения 80°C, для подшипников качения 90°C (температура масла при этом не должна быть более 60°C). Для смазки подшипников электрических машин мощностью до 500 кВт с кольцевой смазкой применяется индустриальное масло марок И-20А, И-30А, И-40А и И-50А вязкостью от 20 до 50 сСт при температуре масла 50°C.

Согласно ГОСТ 20815-75, амплитуда вибрации подшипников электродвигателей, массой выше 2000 кг, не соединенных с исполнительным механизмом, не должна превышать значений, представленных в табл. 3.1.

Таблица 3.1**Допустимая вибрация электрических машин**

№ п/п	Номинальная частота вращения, n , об/мин	Амплитуда виброскорости, v_m , мм/с	Амплитуда вибро-смещения, A_m , мкм
1	2	3	4
1	3000	4,5	30
1	2	3	4
2	1500	3,9	50
3	1000	3,2	65
4	750	2,7	75
5	600	2,5	80

Допустимая вибрация электрических машин массой до 2000 кг приведена в табл. 7.2.

Вибрация сверх допустимых норм угрожает целостности самого электродвигателя, может вызвать поломку исполнительного механизма, повышает нагрев подшипников сверх допустимой температуры, что может привести к возникновению пожара на всем агрегате;

- Электродвигатели с принудительной смазкой подшипников снабжаются блокировкой, отключающей электродвигатель при прекращении подачи смазки;
- При кнопочном управлении электродвигателем кнопки управления «Пуск» и «Стоп» должны располагать в удобном и безопасном для обслуживания месте;
- В местной инструкции по обслуживанию электроустановок должны быть указаны все случаи, при которых электродвигатель останавливается аварийно;
- Вращающиеся части машины – муфты сцепления с исполнительным механизмом, вентиляторы, открытые части валов должны иметь ограждения во время работы;
- Ремонт подшипников скольжения электрических машин сводится к восстановлению зазоров, необходимых для циркуляции масла и создания масляного клина, для чего вкладыши подшипников, заполненные баббитом Б-83, перезаливаются. После перезаливки вкладышей и их расточек зазоры в верхних и боковых сечениях должны быть равными 0,02% и 0,01% от диаметра вала соответственно.

3.5. КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Активная мощность в сети синусоидального тока выражается формулой:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi, \text{ Вт}, \quad (3.3)$$

где φ – угол сдвига между напряжением U и общим током I в цепи.

Отсюда следует, что при неизменном напряжении (что обычно бывает в условиях практики) одна и та же активная мощность может быть передана либо при большом токе и высоком $\cos\varphi$, либо при малом токе и высоком $\cos\varphi$. Так как потери электрической энергии в питающих проводах пропорциональны квадрату тока $P = I^2 \cdot R \cdot \cos\varphi$, то выгоднее передавать энергию при малом токе и высоком $\cos\varphi$ потребителей [3, с. 75].

Известно, что $\cos\varphi$ это отношение активного тока I_a , протекающего по проводникам или обмоткам электрической машины, или трансформатора к общему току, т.е. к сумме активного и реактивного тока I_p , как векторная сумма токов, протекающих в индуктивной I_l и емкостной ветвях сети I_c :

$$\cos\varphi = \frac{I_a}{\sqrt{I_a^2 + I_p^2}}. \quad (3.4)$$

Наибольшая мощность, которую можно получить от генератора или трансформатора, определяется номинальным током и номинальным напряжением. Номинальный ток машины (аппарата) определяется исходя из условий допустимого нагрева обмоток и других частей, а номинальное напряжение – из условия допустимой прочности изоляции. Поэтому наибольшую активную мощность генератор или трансформатор развивает при $\cos\varphi = 1$, так как $P_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi$. В этом случае генератор или трансформатор используется более эффективно.

В электрических сетях промышленных предприятий всегда имеются потребители энергии (асинхронные двигатели, сварочные и другие трансформаторы, индукционные печи и т.д.), которые нуждаются в реактивной мощности (индуктивной её составляющей) для создания переменных магнитных полей.

Если к потребителю, нуждающемуся в получении реактивной энергии (индукционная печь плавки металла), подключить параллельно конденсатор (см. рис. 3.3), то $\cos\varphi$ системы увеличивается [3, с. 71].

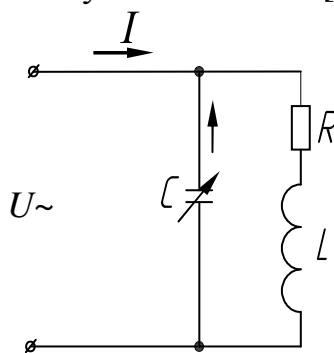


Рис. 3.3. Подключение конденсатора для повышения $\cos\varphi$:

R, L – активная и индуктивная нагрузки потребителя; C – конденсатор с переменной ёмкостью; I – общий ток в линии

Реактивная энергия, необходимая потребителю для образования магнитного поля, будет в этом случае получена частично от конденсатора. При увеличении емкости конденсатора опережающие реактивные токи

скомпенсируют отстающие токи в питающей линии, в результате чего общий линейный ток при постоянной активной нагрузке будет уменьшаться, а $\cos\varphi$ – увеличиваться. Равенство опережающих и отстающих токов (резонанс токов) обеспечит их полную компенсацию при $\cos\varphi = 1$. В этом случае общий ток будет наименьшим. Дальнейшее увеличение емкости вызовет увеличение общего тока в линии и снижение $\cos\varphi$ при опережающем общем токе.

3.6. КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

При подключении к электрической сети активно-индуктивной нагрузки ток нагрузки I_H отстает от напряжения на угол сдвига φ . Косинус этого угла ($\cos\varphi$) называется *коэффициентом мощности*. Электроприемники с такой нагрузкой (асинхронные двигатели, трансформаторы различного назначения, реакторы, вентильные преобразователи и другие электрические устройства) потребляют как активную P , так и реактивную Q мощность. Реактивная мощность $Q = P \cdot \cos\varphi$. Активная энергия, потребляемая электроприемниками, преобразуется в другие виды энергии: механическую, тепловую, энергию сжатого воздуха и газа и т.п. Определенный процент активной энергии расходуется на потери. Реактивная мощность Q не выполняет полезную работу и расходуется на создание электромагнитных полей в электродвигателях, трансформаторах и линиях передачи электроэнергии. Реактивная мощность может иметь индуктивный или емкостной характер. Реактивная индуктивная мощность Q_L является нагрузочной или потребляемой, а реактивная емкостная мощность Q_C – генерируемой.

Прохождение в электрических сетях реактивных токов увеличивают потери активной мощности в линиях, трансформаторах, генераторах электрических станций, увеличивают потери напряжения, требует увеличения номинальной мощности в трансформаторах, снижает пропускную способность электрических сетей:

$$\text{Полная мощность } S = \sqrt{P^2 + Q^2} = P \cdot \cos\varphi;$$

$$\text{Потери активной мощности } \Delta P = (P^2 + Q^2) \frac{R}{U_{\text{НОМ}}^2};$$

$$\text{Коэффициент мощности } \cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}};$$

$$\text{Потери напряжения } \Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_{\text{НОМ}}},$$

где P , Q , S – соответственно активная, реактивная и полная мощности, Вт, ВАР, ВА;

R и X – соответственно активное и реактивное сопротивления элементов электрической сети, Ом;

$U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение сети.

Реактивной мощностью дополнительно нагружаются питающие и распределительные сети, соответственно увеличивается общее потребление электроэнергии.

Прохождение больших реактивных токов вызывает повышенный нагрев токоведущих частей и изоляции, что может привести к пожару в распределительных устройствах, в кабельных сетях и других элементах энергоснабжения и будет причиной дальнейшего развития аварии и увеличения производственного травматизма.

К техническим средствам искусственной компенсации реактивной мощности относятся следующие виды компенсирующих устройств: конденсаторные батареи (КБ), синхронные двигатели, вентильные статические источники реактивной мощности (ИРМ).

Сущность компенсации реактивной мощности поясняется на рис. 3.4.

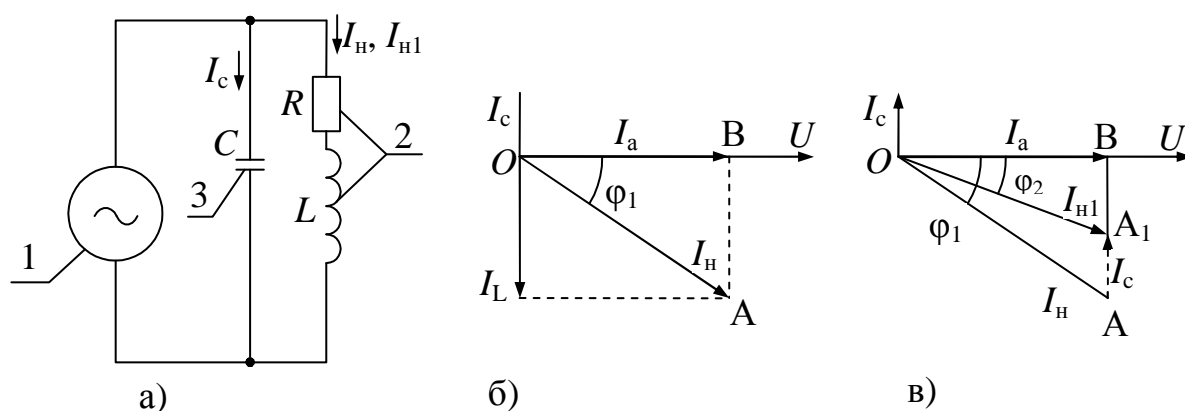


Рис. 3.4. Схема компенсации реактивной мощности:

a - схема электрической цепи; *б* - векторная диаграмма реактивной мощности до компенсации; *в* - векторная диаграмма реактивной мощности после компенсации;

I – генератор переменного тока; 2 – активно-индуктивная нагрузка с активным R и индуктивным L сопротивлениями (асинхронный двигатель); 3 – конденсаторная батарея емкостью C

Пусть до компенсации потребитель 2 имел активную мощность P и соответствующий ток I_a (отрезок OB на векторной диаграмме *б*) и реактивную мощность Q от индуктивной нагрузки с соответствующим током I_L (отрезок BA). Полной мощности S соответствует вектор тока нагрузки I_N (отрезок OA). Коэффициент мощности до компенсации равен $\cos\varphi_1$.

После компенсации, т.е. после подключения параллельно нагрузке конденсатора 3 мощностью Q_K с соответствующим током I_C , суммарная реактивная мощность потребителя будет меньше $Q - Q_K$, и ток нагрузки снизится и будет равен $I_{N1} = I_N - I_C$, соответственно снизится угол сдвига фаз с φ_1 до φ_2 и повысится коэффициент мощности с $\cos\varphi_1$ до $\cos\varphi_2$. Полная потребляемая мощность при той же потребляемой активной мощности P (ток I_a) снизится с S (ток I_N) до S_1 (ток I_{N1}) (отрезок OA_1). Следовательно, в результате компенсации можно при том же сечении проводников повысить пропускную способность сети по активной мощности.

Недостатками конденсаторных батарей являются: пожароопасность, наличие остаточного заряда, повышающего опасность при обслуживании; чувствительность к перенапряжениям и толчкам тока; возможность только ступенчатого, а не плавного регулирования мощности.

Рассмотрим другой вид компенсирующих устройств (КУ) – синхронные двигатели. Синхронные двигатели (СД) при увеличении тока возбуждения выше номинального значения могут вырабатывать реактивную мощность, следовательно, их можно использовать как средство компенсации реактивной мощности. Главным отличием синхронных двигателей от асинхронных (АД) является то, что магнитное поле, необходимое для работы СД, создается от отдельного источника постоянного тока (возбудителя). Вследствие этого СД в нормальном режиме (при $\cos\varphi = 1$) почти не потребляет из сети реактивной мощности, необходимой для создания плавного магнитного потока, а в режиме перевозбуждения, т.е. при работе с опережающим коэффициентом мощности, может генерировать емкостную реактивную мощность в сеть. Преимуществом СД, используемого для компенсации реактивной мощности, по сравнению с КБ является возможность плавного регулирования генерируемой реактивной мощности.

Дополнительные активные потери в обмотке СД, кВт, вызываемые генерируемой реактивной мощностью в пределах изменения $\cos\varphi$ от 1 до 0,9 при номинальной активной мощности СД, равной $P_{\text{НОМ}}$, определяются:

$$\Delta P_{\text{НОМ}} = \frac{Q_{\text{НОМ}}^2 \cdot r}{U_{\text{НОМ}}^2}, \quad (3.5)$$

где $Q_{\text{НОМ}}$ – номинальная реактивная мощность СД, квар;

r – сопротивление одной фазы обмотки СД, Ом;

$U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение сети.

Таким образом, из изложенного следует вывод: компенсация реактивной мощности на энергетических предприятиях есть средство повышения надежности, производственной безопасности и экономичности при работе электротехнического оборудования.

3.7. ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Любое промышленное предприятие является потребителем как активной, так и реактивной энергии.

Асинхронные электродвигатели, силовые, сварочные и другие специальные трансформаторы, катушки контакторов и реле, линии электропередачи потребляют вместе с активной и реактивную мощность. Эта мощность затрачивается на создание переменных электромагнитных полей. Известно, чем больше в сети реактивной мощности при постоянной активной мощности, тем ниже $\cos\varphi$ и КПД предприятия.

Реактивная мощность, потребляемая промышленными предприятиями, распределяется следующим образом: около 70% приходится на долю

асинхронных двигателей, около 20% – на долю трансформаторов и около 10% на долю воздушных сетей и различных машин и аппаратов, имеющих индуктивность. Станочное оборудование с циклическими режимами работы, цеховые краны при повторно-кратковременных режимах работы, электросварочные трансформаторы, индукционные электрические печи относятся к группам с низким $\cos\varphi$. Такие потребители, как электрические печи сопротивления, сушильные аппараты и шкафы, имеют высокий $\cos\varphi$ (близкий к единице).

При снижении коэффициента мощности потребителей вследствие возрастания реактивного тока увеличиваются потери электроэнергии в сетях, трансформаторах и генераторах. При значительном снижении $\cos\varphi$ трансформаторы и генераторы оказываются настолько загруженными реактивными токами, что дальнейшее получение от них активной мощности становится невозможным и требуется их замена на более мощные. Кроме того, при снижении коэффициента мощности увеличиваются потери напряжения в сетях, питающих предприятие, вследствие возрастания токов. Понижение напряжения на предприятии вызывает нарушение работы его потребителей, отключение отдельных установок, недовыработку продукции.

С другой стороны, значительная величина потерь электроэнергии, вызванная низким коэффициентом мощности, приводит к повышению как удельного, так и общего расхода электроэнергии на предприятии. А это, в свою очередь, вызывает увеличение затрат на единицу выпускаемой продукции.

В практике эксплуатации электроустановок промышленных предприятий различают значения мгновенного и средневзвешенного коэффициента мощности.

Значение мгновенного $\cos\varphi$ определяется фазометром или подсчитывается по показаниям амперметра, вольтметра и ваттметра по формуле:

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}. \quad (3.6)$$

Под средневзвешенным $\cos\varphi$ подразумевается усреднённое значение за какой-либо период времени (например, час, сутки, месяц, год), определяемое по показаниям счётчиков активной и реактивной энергии:

$$\cos\varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_p^2}}, \quad (3.7)$$

где W_a – расход активной энергии в течение определённого времени, кВт·ч;
 W_p – расход реактивной энергии в течение того же времени квар·ч.

Причины низкого коэффициента мощности и способы его повышения

Асинхронные двигатели, как указывалось ранее, потребляя значительную часть реактивной мощности, оказывают большое влияние на коэффициент мощности предприятия. $\cos\varphi$ асинхронных двигателей зависит от степени их загрузки, уменьшаясь при её снижении. При холостом ходе асинхронных двигателей $\cos\varphi$ незначителен и составляет величину от 0,1 до 0,25. Поэтому необходимо не допускать холостого хода и недогрузки как отдельных двигателей, так и всего технологического оборудования.

Недостаточная нагрузка трансформаторов, особенно силовых, также приводит к понижению коэффициента мощности оборудования. При холостом ходе трансформатора его $\cos\varphi = 0,1 \div 0,2$.

Прерывистые технологические процессы, длительные простои оборудования, восстановительные ремонты неполадок и аварий отрицательно влияют на коэффициент мощности предприятия.

$\cos\varphi$ электроустановок зависит также от типа, конструктивного исполнения и эксплуатационного режима работы. Тихоходные асинхронные высоковольтные двигатели имеют невысокий коэффициент мощности. Чем больше номинальная скорость асинхронных двигателей, тем выше их $\cos\varphi$. Увеличение воздушного зазора между статором и ротором асинхронных двигателей после некачественного ремонта приводит к увеличению намагничивающих токов, а следовательно, к снижению $\cos\varphi$ двигателя.

Мероприятия по повышению коэффициента мощности на предприятиях делятся на две основные категории:

А) естественная компенсация, не требующая применения специальных компенсирующих устройств, связана с улучшением работы установленного оборудования.

Б) искусственная компенсация требующая применения специальных компенсирующих устройств, установленных вблизи потребителей электрической энергии.

– К мероприятиям первой категории относятся:

- упорядочение технологического процесса, его равномерность и загруженность оборудования;
- понижение напряжения на обмотках статора путём ручного или автоматического переключения с треугольника на звезду;
- устранение холостой работы асинхронных двигателей с помощью ограничителей холостого хода;
- замена малонагруженных асинхронных двигателей двигателями меньшей номинальной мощности;
- замена трансформаторов, загруженных ниже 30 % их номинальной мощности, менее мощными;
- применение синхронных двигателей для всех новых установок электропривода, не нуждающихся в искусственной компенсации реактивной мощности.

Перечисленные мероприятия способствуют повышению коэффициента мощности $\cos\varphi$ до нормативной величины 0,92 – 0,95.

В синхронных машинах относительная скорость магнитного поля равна нулю, т.е. частота вращения магнитного поля статора и частота вращения ротора машины равна между собой.

Повышение производительности технологического оборудования при неизменной установленной мощности приводит к повышению $\cos\varphi$ и КПД предприятия. Как показывают исследования, замена малонагруженных асинхронных двигателей целесообразна лишь в том случае, если их нагрузка не превышает 45% номинальной. При загрузке от 45 до 70% номинальной мощности рентабельность замены необходимо обосновать расчетами. При загрузке двигателей свыше 70% замену производить не следует.

– К мероприятиям второй категории относятся:

- установка статических конденсаторов вблизи приемников электрической энергии;
- установка синхронных компенсаторов на предприятии.

На промышленных предприятиях применяют главным образом статические (косинусные) конденсаторы. Их изготавливают как для низких (в трехфазном исполнении), так и для высоких напряжений (в однофазном исполнении). Необходимая мощность компенсирующего устройства определяется по формуле:

$$Q_c = P(\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_1), \text{ кВт} \quad (3.8)$$

где P – активная мощность установки, кВт; φ – угол сдвига фаз между током и напряжением до компенсации; φ_1 – то же после компенсации.

Как отмечалось ранее, реактивная мощность вызывает появление активных потерь в сетях, питающих предприятие, что вызывает необходимость в увеличении сечения электрических проводников. При повышении $\cos\varphi$ величины этих потерь уменьшаются. С другой стороны, повышение коэффициента мощности требует затраты на компенсирующие установки (конденсаторы). Значение $\cos\varphi$, при котором суммарные затраты по передаче и компенсации реактивных нагрузок будут наименьшими, называется оптимальным коэффициентом мощности.

Кроме того, следует знать, что при избытке генерируемых в сети реактивных опережающих токов при малых нагрузках в сети может возрасти уровень напряжения, что приведёт к уменьшению срока службы осветительных ламп, а иногда и к массовому выходу их из строя. Поэтому компенсацию реактивной мощности и регулирование напряжения в энергосистеме предприятия следует решать комплексно [17, с. 343].

ГЛАВА 4

ТРАНСФОРМАТОРЫ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ

4.1. СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ. ПРИНЦИП РАБОТЫ

Силовой трансформатор – это статическое электромагнитное устройство, имеющее несколько связанных магнитным полем обмоток и предназначенное для преобразования переменного тока посредством электромагнитной индукции. Различают трансформаторы с двумя, тремя или несколькими гальванически несвязанными обмотками. Передача энергии из первичной цепи трансформатора во вторичную происходит с помощью электромагнитного поля.

Обычно приемники электроэнергии расположены на определенном расстоянии. Иногда эти расстояния измеряются сотнями и тысячами километров. Генераторы на электрических станциях вырабатывают электроэнергию напряжением не выше 10-20 кВ. Энергия большой мощности $P = \sqrt{3}U \cdot I$, МВт при небольшом напряжении может быть передана только при большом значении тока I . Для этого потребуются провода больших сечений, иначе потери мощности $\Delta P = 3I^2 \cdot R_0 \cdot l$ (R_0 – сопротивление 1 км линии передачи, Ом/км; l – длина линии, км) будут большими. Чем больше мощность и длина линии передачи, тем больше потери мощности. При некоторых значениях P и l передача электроэнергии становится экономически невыгодной. Но, если ту же самую мощность передавать при более высоком напряжении, то $I = \frac{P}{\sqrt{3}U}$, а следовательно, и потери мощности ΔP уменьшатся. Такое изменение напряжения при практически неизменной передаваемой мощности осуществляется с помощью силовых трансформаторов. Силовые трансформаторы могут повышать напряжение генераторов электростанций до 35, 110, 220, 330, 500 и 750 кВ.

Силовые трансформаторы могут быть общего назначения, предназначенные для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого (более высокого или низкого) напряжения, не отличающихся особыми условиями и режимами работы, например, печные трансформаторы в металлургической промышленности.

Для трансформации трехфазного тока можно использовать три однофазных трансформатора, обмотки которых соединяются по схеме звезды или треугольника. На практике применяют трехфазные трансформаторы с общим для всех фаз магнитопроводом, имеющим три стержня, на каждом из которых имеются обмотки низкого и высокого напряжения соответствующих фаз. Такой трехфазный трансформатор, первичная и вторичная обмотки которого соединены в звезду, схематически показан на рис. 4.1.

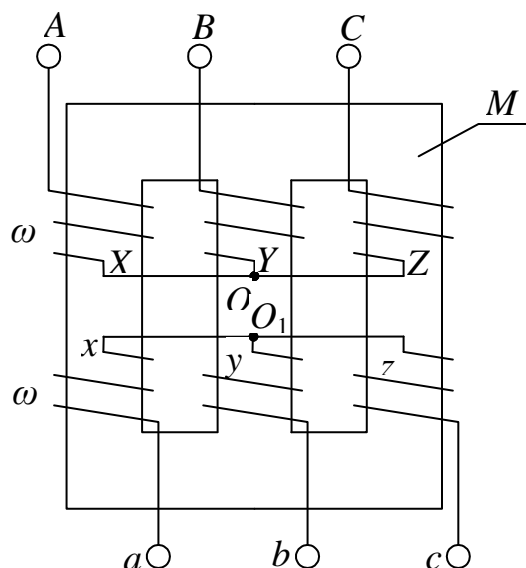


Рис. 4.1. Схема включения трехфазного трехстержневого трансформатора:
 A, B, C – выходы обмоток высокого напряжения; X, Y, Z – концы обмоток высокого напряжения; a, b, c – выходы обмоток низкого напряжения; x, y, z – концы обмоток низкого напряжения; O, O_1 – нейтральные точки высокого и низкого напряжения соответственно; M – трехстержневой магнитопровод; ω_1, ω_2 – число витков в первичных и вторичных обмотках

Зажимы трехфазного трансформатора различают в порядке чередования фаз: на стороне высокого напряжения зажимы A, B, C – начало обмоток, X, Y, Z – их концы обозначаются прописными (большими) буквами; на стороне низкого напряжения теми же буквами, но строчными (маленькими).

Соединение обмоток в звезду является самым простым и дешевым, поскольку каждая из обмоток и ее изоляция должны быть рассчитаны только на фазные напряжения и линейный ток. Соединение звезда-треугольник применяют для трансформаторов большой мощности в тех случаях, когда на стороне низкого напряжения не требуется нулевой рабочий проводник N .

Магнитопровод M в трансформаторе необходим для усиления электромагнитной связи между обмотками. Для уменьшения потерь от вихревых токов магнитопровод собирают из листов электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм. Листы изолируют друг от друга лаком, тонкой бумагой. Листы собирают «внахлестку», т.е. с перекрытием зазоров. Это позволяет обеспечить высокую магнитную проводимость магнитопровода и ограничить пути для прохождения вихревых токов. Листы магнитопровода стягиваются болтами, пропущенными через изолированные втулки.

В системе электроснабжения используют в основном масляные трансформаторы. В них магнитопровод с обмотками помещают в бак с электроизоляционным трансформаторным маслом. Масло повышает электрическую прочность изоляции, а его циркуляция улучшает охлаждение обмоток и магнитопровода. Сухие трансформаторы с воздушным

охлаждением рассчитаны на меньшую мощность, чем масляные, выполняются на напряжение до 10 кВ и более, надежны по условиям пожарной безопасности.

Действие трансформатора основано на явлении взаимной индукции между первичными и вторичными обмотками ω_1 и ω_2 .

Работа трансформаторов

Если первичную обмотку трансформатора подключить к источнику переменного напряжения U_1 , то по ней будет протекать ток I_1 , который возбудит в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток Φ . Этот поток, пронизывая витки вторичных обмоток трансформатора, будет индуцировать в них ЭДС E_1 и E_2 . Если вторичную обмотку замкнуть на приемник энергии Z_H , то по этой обмотке и через приемник будет протекать ток I_2 . Таким образом, электрическая энергия, трансформируясь, передается из первичной цепи во вторичную.

Действующие значения ЭДС при синусоидальном изменении магнитного потока Φ определяются: $E_1 = 4,44\omega_1 f \Phi_m$, где f – частота тока в сети, Гц; Φ_m – максимальное значение основного магнитного потока, Вб. Отношение ЭДС обмоток трансформатора, равное отношению числа витков ω_1 и ω_2 называется коэффициентом трансформации

$$K_T = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}. \quad (4.1)$$

При $K_T > 1$ трансформатор понижающий, при $K_T < 1$ – повышающий.

Любой трансформатор может быть использован и как повышающий, и как понижающий.

В рабочем режиме работы трансформатора по его обмоткам ω_1 и ω_2 проходят токи I_1 и I_2 при напряжении на обмотках U_1 и U_2 . В номинальном рабочем режиме номинальные токи I_{1H} , I_{2H} проходят при номинальных напряжениях U_{1H} , U_{2H} .

Если пренебречь потерями в трансформаторе, то можно считать равными мощности трансформатора, потребляемую из сети и отдаваемую потребителю: $U_1 I_1 = U_2 I_2$. Тогда $\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = K_T$; $I_2 = K_T I_1$.

В понижающем трансформаторе $U_1 > U_2$ в K_T раз; $I_1 < I_2$ также в K_T раз. В повышающем трансформаторе соотношения обратные. Загрузка трансформатора в рабочем режиме оценивается коэффициентом β :

$$\beta = \frac{P_2}{S_H \cdot \cos\varphi} = \frac{I_2}{I_{2H}}. \quad (4.2)$$

где P_2 – полезная активная мощность трансформатора;

S_H – номинальная полная мощность;

$\cos\varphi$ – коэффициент мощности нагрузки;

I_2 – ток нагрузки в рабочем режиме;

I_{2H} – ток нагрузки в номинальном режиме.

С изменением нагрузки меняются токи I_1 и I_2 в обмотках трансформатора, падение напряжения в них и напряжение U_2 на зажимах вторичной обмотки.

Зависимость $U_2(I_2)$ называется внешней характеристикой трансформатора.

При обычной активно-индуктивной нагрузке эта характеристика имеет вид наклонной прямой, представленной на рис. 4.2, на котором отмечено изменение напряжения ΔU при номинальном токе I_{2H} .

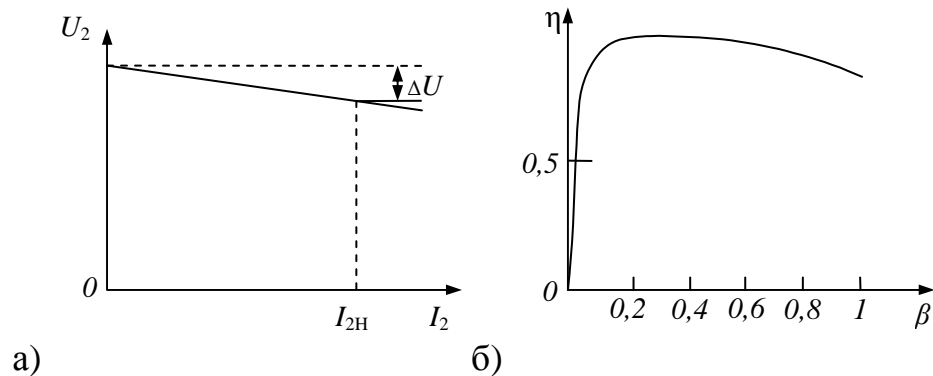


Рис. 4.2. Характеристики трансформатора:

a - внешняя характеристика трансформатора; *б* - график зависимости $\eta = f(\beta)$

Преобразование электроэнергии в трансформаторах происходит с высоким КПД (до 98-99% в мощных трансформаторах).

Периодические изменения магнитного поля в магнитопроводе сопровождаются потерями в стали магнитопровода на гистерезис и вихревые токи. Эти потери зависят от сорта стали, возрастают с увеличением частоты, магнитной индукции и массы магнитопровода. Потери в стали не зависят от нагрузки и равны потерям холостого хода ΔP_0 :

$$\Delta P_{СТ} = \Delta P_0.$$

Прохождение токов по обмоткам трансформатора вызывает потери мощности в обмотках, пропорциональные квадрату коэффициента загрузки трансформатора β :

$$\Delta P_{об} = \beta^2 \Delta P_H, \quad (4.3)$$

где ΔP_H – номинальные потери в обмотках.

КПД трансформатора определяется из выражения:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{СТ} + \Delta P_{об}}. \quad (4.4)$$

На рис. 3.4,б показана зависимость $\eta = f(\beta)$. Видно, что при начальном нагружении трансформатора КПД резко возрастает, а затем меняется очень мало, достигая при некотором значении β максимума [4].

Защита силовых трансформаторов

Выбор защиты трансформаторов зависит от мощности, назначения, места установки и эксплуатационного режима трансформаторов.

В силовых трансформаторах возможны следующие виды повреждений: междуфазные в обмотках внутри бака и на выводах; витковые замыкания одной фазы; однофазные замыкания на землю; увеличением токов в обмотках, обусловленные внешними КЗ; токовые перегрузки обмоток, понижение уровня масла.

Для защиты трансформаторов при их повреждении и для сигнализации о нарушении нормальных режимов работы применяются следующие основные виды защиты:

- максимально токовая защита (МТЗ), срабатывающая от резкого увеличения тока цепи при КЗ или перегрузках;
- газовая защита, применяется при повреждениях внутри кожуха трансформатора, сопровождающихся выделением газов, и при понижении уровня масла;
- защита от замыканий на землю, в сетях напряжением 110 кВ и выше, работающих с глухозаземленными нейтралью. Однофазные замыкания на землю сопровождаются прохождением больших токов, поэтому релейная защита от однофазных КЗ работает на отключение трансформатора;
- защита предохранителями. Цеховые трансформаторы мощностью до 1000 кВА могут быть защищены предохранителями, которые встраиваются в выключатели нагрузки типа ВНП. Выбор типа предохранителя зависит от напряжения и мощности трансформатора, например, при $S = 100$ кВА и $U = 6$ кВ тип предохранителя ПК-6/30 с током плавкой вставки 20 А.

4.2. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТЕ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Согласно «Правилам технической эксплуатации электроустановок потребителей», безопасность эксплуатации силовых трансформаторов обеспечивается следующими требованиями:

- На баках силовых трансформаторов должны быть сделаны надписи, указывающие тип, мощность и порядковый номер трансформатора.
- Трансформаторы наружной установки должны быть окрашены в светлые тона.
- На дверях трансформаторных пунктов и камер укрепляются предупредительные плакаты по технике безопасности установленной формы.

- Все двери трансформаторных пунктов должны быть заперты на замок.
- Все масляные трансформаторы мощностью 1000 кВА и выше оборудуются газовой защитой. Она осуществляется при помощи специального газового реле, реагирующего на выделение газов в баке трансформатора. Внутренние повреждения (замыкания, нарушение изоляции) и повышенные температуры внутри бака масляного трансформатора вызывают разложение масла и органической изоляции, что сопровождается выделением газа. Для свободного и быстрого движения газа трансформаторы устанавливаются так, чтобы крышка бака имела подъем по направлению к газовому реле не менее 1-1,5%. А маслопровод от трансформатора к расширителю – не менее 2-4%. Выхлопная труба снабжается мембраной и соединяется с верхней частью расширителя. Для обслуживания трансформаторов должны быть обеспечены удобные и безопасные условия наблюдения за уровнем и температурой масла, газовым реле, а также для отбора проб масла.
- Газовая защита является чувствительной защитой от внутренних повреждений (межфазные, межобмоточные замыкания, нарушение внутренней изоляции) или ненормального режима работы трансформатора (короткие замыкания, перегрузка). Настоящая защита в зависимости от интенсивности срабатывает на сигнал, на отключение, или одновременно на то и другое.
- Для контроля температуры верхних слоев масла в карманы, расположенные на крышке трансформаторного бака, помещаются термодары или манометрические термометры. Температура верхних слоев масла для трансформаторов с естественным охлаждением не должна быть выше 95°C, у трансформаторов с принудительным охлаждением – 75°C. Согласно ГОСТ 11677–83, превышение температуры масла над температурой окружающей среды должно быть не более 60°C. При наличии маслоохладителей с водяным охлаждением маслонасос устанавливается до маслоохладителя по ходу масла. Давление масла в маслоохладителе должно превышать давление пропускаемой через них воды. При включении системы охлаждения трансформатора в первую очередь пускается масляный насос, а затем водяной. При отключении, наоборот, сначала отключается водяной насос, а затем масляный. Водяной насос пускается при температуре масла не ниже 10°C. При эксплуатации трансформаторов должны быть предусмотрены меры по предотвращению замораживания маслоохладителей, насосов и водяных магистралей в холодный период года.
- Текущие ремонты силовых трансформаторов (реакторов) проводятся по мере необходимости. Периодичность текущих ремонтов устанавливается главным инженером (главным энергетиком) предприятия.
- Капитальные ремонты (планово-предупредительные) силовых трансформаторов должны проводиться не позднее чем через 12 лет после

- ввода в эксплуатацию, в дальнейшем – по мере необходимости в зависимости от их состояния и результатов диагностического контроля.
- Внеочередные ремонты трансформаторов (реакторов) должны выполняться, если дефект в каком-либо их элементе может привести к отказу.
 - В период ремонтных работ проводится проверка герметичности трансформатора путем создания в баке избыточного давления 15 кПа (0,15 кг/см²). Создание избыточного давления осуществляется подачей сухого воздуха через силикагелевый осушитель компрессором или подачей в бак инертного газа (азота) из баллонов. Трансформатор считается герметичным, если через три часа давление понизится не более чем до 13 кПа (0,13 кг/см²).
 - Аварийный вывод силовых трансформаторов из работы необходим:
 - при сильном неравномерном шуме и потрескивании внутри трансформатора;
 - при постоянно возрастающем нагреве трансформатора при нормальной нагрузке и работе охлаждающих устройств;
 - при течи масла с понижением уровня в масломерном стекле расширителя.
 - Трансформаторы выводятся из работы также при необходимости немедленной замены масла по результатам лабораторных анализов.

Безопасность персонала от поражения электрическим током в период ремонтных работ оборудования силовых трансформаторов обеспечивается:

- защитным заземлением, установленным штатно на кожухе трансформатора;
- установкой переносных заземлений со всех сторон откуда может быть подано напряжение;
- если работа проводится на проводниках или устройствах вблизи силового трансформатора, выведенного в ремонт, необходимо установить переносное заземление непосредственно на рабочем месте для защиты от наведенного потенциала соседних трансформаторов и линий, находящихся под напряжением [1].

Изоляция силовых трансформаторов

Изоляция является важным элементом трансформаторов, определяющим в значительной степени массу, габариты, надежность и безопасность в работе. Различают внутреннюю изоляцию, т.е. изоляцию токоведущих частей, находящихся в баке с маслом, и внешнюю – воздушную. К внутренней (масляной) изоляции относится главная изоляция обмоток, а также изоляция отводов и переключателей напряжения. К внешней (воздушной) изоляции относится наружная изоляция вводов, воздушные промежутки между вводами и между вводами и заземленными

частями трансформатора. Большое значение для качества изоляции и поведения ее в эксплуатации имеет технология обработки изоляции. Например, обмотки напряжением 110 кВ и выше проходят следующие основные операции технологической обработки: вакуумную сушку при температуре $90 \div 110$ °С; пропитку глифталевым лаком ГФ-95 (1154); вакуумную сушку магнитной системы с собранными на ней обмотками; пропитку маслом под вакуумом; заливку масла в собственный бак под вакуумом. Применение вакуума при сушке, а также при пропитке обмоток лаком, маслом и заливке масла в бак обеспечивает полное удаление из твердой изоляции масла, влаги и газовых включений. Качество изоляции определяется при испытаниях в период капитальных или профилактических ремонтов силовых трансформаторов, объем и сроки испытаний устанавливаются Правилами эксплуатации электроустановок потребителей.

Полученные при испытаниях значения сопротивлений внутренней и внешней изоляции трансформатора не должны отличаться более чем на 2% от сопротивлений, занесенных в паспортные данные.

4.3. НАДЗОР ЗА РАБОТОЙ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ (РЕАКТОРОВ)

Контроль нагрузки трансформаторов осуществляется по показаниям приборов: амперметров, ваттметров, термометров или термосигнализаторов. Периодичность контроля зависит от того, является данная установка обслуживаемой или необслуживаемой. Согласно ПТЭ, контрольный осмотр трансформаторов (без их отключения) проводится в следующие сроки:

- в установках с постоянным дежурством эксплуатационного персонала – один раз в сутки;
- в установках без постоянного дежурства эксплуатационного персонала – не реже одного раза в месяц;
- на трансформаторных пунктах – не реже одного раза в месяц.

В зависимости от местных условий и состояния трансформаторов (реакторов) указанные сроки могут быть изменены ответственным за электрохозяйство предприятия должностным лицом. Внеочередные осмотры трансформаторов (реакторов) производятся: после неблагоприятных погодных воздействий (гроза, резкое изменение температуры, сильный ветер и др.); при работе газовой защиты на сигнал, а также при отключении трансформатора газовой или дифференциальной защитой (отключает только поврежденную фазу).

При осмотре трансформаторов должны быть проверены: показания термометров, термосигнализаторов и мановакуумметров;

- состояние кожухов трансформатора и отсутствие течи масла;

- соответствие уровня масла в расширителе температурной отметке и наличие масла в маслонаполненных вводах;
- состояние маслоохлаждающих и маслосборных устройств, состояние изоляторов и кабелей;
- отсутствие нагрева отдельных устройств и контактных соединений;
- исправность сигнализации и пробивных предохранителей (разрядников);
- исправность сети защитного заземления;
- состояние строительной части трансформаторного помещения, отсутствие течи в крыше, исправность запоров дверей в камерах и самого помещения;
- исправность вентиляции и характер гудения сердечника.

У трансформаторов, установленных на открытом воздухе, проверяется состояние фундамента и маслоприемников для сброса масла при тяжелых авариях с возникновением пожара на трансформаторе. Обнаруженные недостатки фиксируются в оперативном журнале дежурного персонала, и при необходимости немедленного их устранения сообщают старшему по смене.

К нарушениям нормальной работы силовых трансформаторов, требующих немедленного принятия защитных мер, относятся:

- сколы фарфора на изоляторах со следами перекрытия;
- нагрев масла выше нормы при нормальной нагрузке и нормальной температуре среды;
- сильный неравномерный шум;
- резкое ухудшение свойств изоляционного масла по сравнению с предыдущим анализом [6].

4.4. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Измерительные трансформаторы предназначены для отделения цепей измерения и защиты от первичных сетей высокого напряжения. К ним относятся трансформаторы тока (*ТА*) и трансформаторы напряжения (*ТВ*).

Трансформаторы тока

ТА служат для преобразования токов больших значений в токи малых величин 5; 2,5 и 1А, необходимых для питания измерительных приборов: амперметров, ваттметров и приборов защиты от коротких замыканий. Схема включения трансформатора тока показана на рис. 4.2.

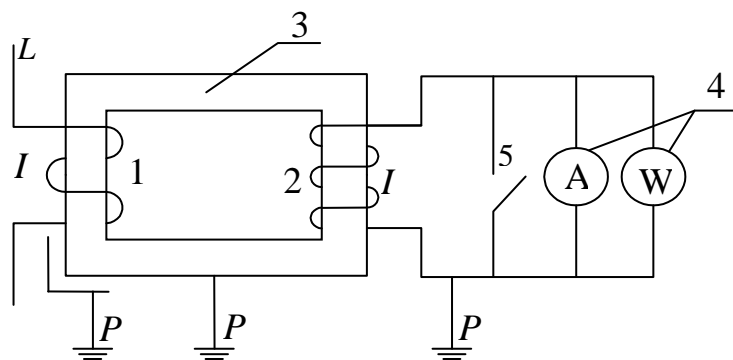


Рис. 4.2. Схема включения трансформатора тока:

L – фазный проводник; I – первичная обмотка с числом витков $\omega_1=1-2$ витка; 2 – вторичная обмотка с большим числом витков ω_2 ; 3 – магнитопровод; 4 – приборы измерения: амперметр (A), ваттметр (W); 5 – кнопка замыкания; PE – заземляющие проводники

Первичную обмотку трансформатора TA с малым числом витков ω_1 включают в линию фазного проводника L с током I_1 последовательно, а вторичную обмотку с большим числом витков ω_2 подключают к приборам измерения тока I или мощности W .

Поскольку число витков первичной обмотки невелико, то иногда первичную обмотку выполняют в виде провода продетого в окно стального сердечника.

Токи первичной и вторичной обмоток связаны зависимостью $I_1\omega_1=I_2\omega_2$ отсюда $I_2 = I_1 \cdot \frac{\omega_1}{\omega_2}$, А

Вторичную цепь трансформатора тока TA во время его работы размыкать нельзя, так как намагничивающее действие тока I_1 не будет скомпенсировано размагничивающим действием тока I_2 , что вызовет чрезмерное возрастание напряжения на концах обмоток ω_2 и увеличения температуры корпуса трансформатора до недопустимой величины. Поэтому при выводе в ремонт или замене измерительных приборов, вторичную цепь необходимо замкнуть кнопкой 5 (см. рисунок). При этом трансформатор будет работать в режиме, близком к короткому замыканию. В целях безопасности обслуживания трансформатора тока необходимо заземлять нулевой вывод вторичной обмотки, магнитопровод и стальной корпус TA проводниками PE.

Трансформаторы тока являются надежным источником оперативного переменного тока для релейной защиты и отключения поврежденного участка сети при возникновении короткого замыкания в схеме первичной коммутации.

Трансформаторы напряжения

TV служат для преобразования высокого напряжения в низкое до величин 100 В или $100/\sqrt{3}$ В. По схеме включения и принципу действия трансформатор напряжения не отличается от силового трансформатора малой мощности.

Первичную обмотку TV высокого напряжения с большим числом витков ω_1 включают на измерительное напряжение U_1 , а вторичную с малым числом витков ω_2 подключают к измерительным приборам, вольтметру V , частотомеру f или к другим приборам.

Схема подключения трансформатора показана на рис. 4.3.

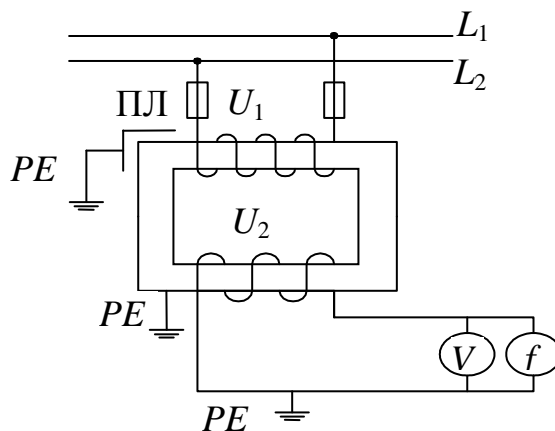


Рис. 4.3. Схема включения трансформатора напряжения:

L_1, L_2 – фазные проводники высокого напряжения; ПЛ – предохранители для защиты от короткого замыкания в обмотках трансформатора

Номинальное вторичное напряжение всех трансформаторов напряжения стандартное, либо 100В, либо $100/\sqrt{3}$ В. Вторичное напряжение U_2 связано с первичным напряжением U_1 коэффициентом трансформации $U_1 = K_U \cdot U_2$, В, где $K_U = \frac{\omega_1}{\omega_2}$ – коэффициент трансформации.

Таким образом, зная величину K_U , и измеряя напряжение U_2 , можно определить первичное высокое напряжение U_1 в сети.

Трансформатор напряжения, в отличие от трансформатора тока, работает с небольшой нагрузкой в режиме, близком к холостому ходу. Потери в стальном сердечнике и рассеяние магнитного потока приводят к погрешностям измерения напряжения.

$$\Delta U\% = \frac{K_U U_1 - U_2}{U_1} \cdot 100\%. \quad (4.5)$$

Трансформаторы напряжения имеют классы точности: 0,2; 0,5; 1; 3. Для точных лабораторных приборов используется трансформатор TV класса 0,2.

Для безопасности обслуживания один (нулевой) зажим, стальной корпус и магнитопровод трансформатора напряжения заземляют проводниками PE . Трансформаторы напряжения не могут служить непосредственным источником оперативного тока, так как при возникновении короткого замыкания в сети напряжение в TV снижается и может оказаться недостаточным для отключения выключателя.

4.5. СВАРОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ. БЕЗОПАСНОСТЬ РАБОТ

Для получения неразъемных соединений, преимущественно стальных деталей широко используется электродуговая сварка. Для этой цели электрическая дуга оказывает тепловое воздействие на свариваемые детали. Роль одного электрода выполняет свариваемая деталь 1, а другого специальный электрод 2 (см. рис. 4.4).

В связи с тем, что расстояние между электродами невелико, температура дуги составляет $1200 \div 1400$ °С и она сосредоточена в маленьком объеме. Происходит быстрый нагрев и плавление металла в месте сварного соединения. Электрод предназначен для подачи тока к месту возникновения дуги и для доставки дополнительного металла, необходимого для образования сварного шва.

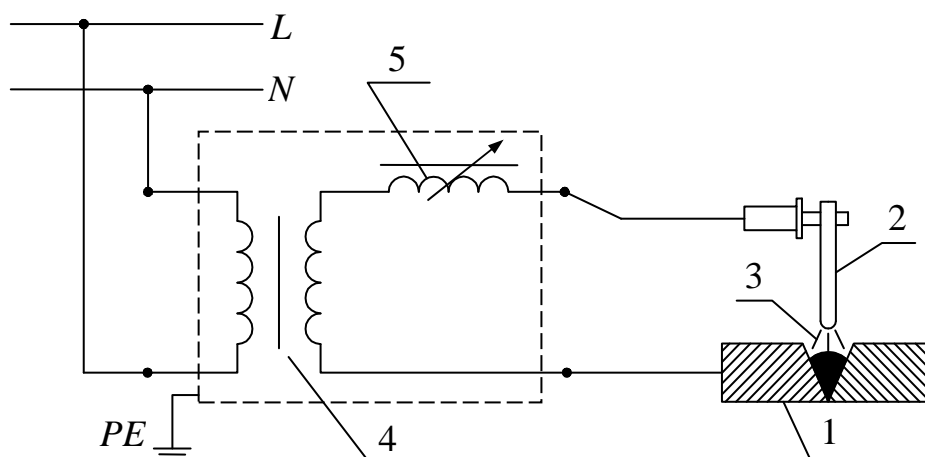


Рис. 4.4. Принципиальная схема подключения сварочного трансформатора:

1 – свариваемая деталь; 2 – сварочный электрод с обмазкой; 3 – дуга сварочного шва; 4 – сварочный однофазный трансформатор T_p ; 5 – дроссель регулирующий Др;
 PE – заземление корпуса T_p

Питание дуги может осуществляться постоянным или переменным током. В первом случае в качестве источника тока используются специальные сварочные генераторы постоянного тока или сварочные агрегаты с вентильными выпрямителями. Во втором случае применяют только сварочные однофазные трансформаторы (рис. 4.4). Сварка переменным током экономически более выгодна: дешевле сварочные агрегаты, ниже расходы по их эксплуатации. Однако переменный ток нельзя использовать для сварки цветных металлов и некоторых марок легированных сталей. Для получения устойчивой дуги и качественного шва необходимо применять электроды с обмазкой.

При дуговой сварке вольтамперная характеристика электрической дуги имеет вид, показанный на рис. 4.5 (кривая 1)

При работе сварочного трансформатора режим короткого замыкания является нормальным эксплуатационным режимом.

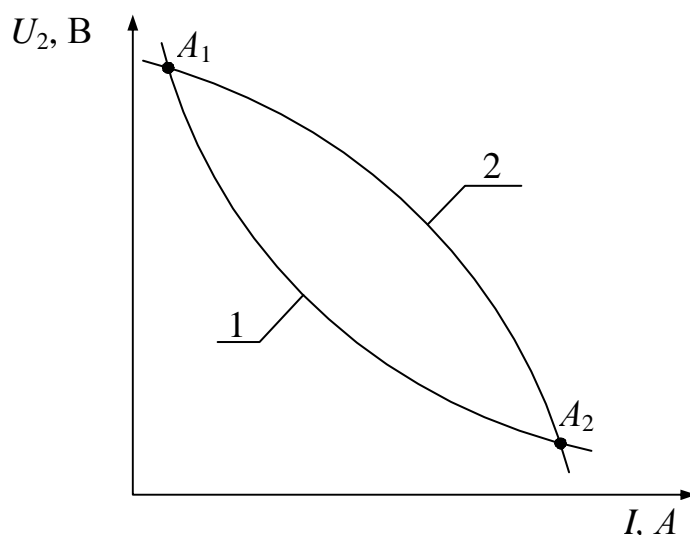


Рис.4.5. Вольт-амперная характеристика электрической дуги 1 и внешняя характеристика сварочного трансформатора 2

Вольт-амперная (или внешняя) характеристика трансформатора должна иметь точки пересечения с вольт-амперной характеристикой дуги, чтобы её горение было устойчивым. Следовательно, сварочный трансформатор должен иметь крутопадающую внешнюю характеристику (кривая 2). Зажигание дуги происходит в точке A_1 при напряжении 60-70 В, а устойчивое горение дуги – в точке A_2 при напряжении 12-30 В и при большом токе 100-300 А. Для получения крутопадающей характеристики используют дроссель 5 (см. рис. 4.4) с большим индуктивным сопротивлением с последовательным включением его во вторичную обмотку трансформатора. Дроссель служит для ограничения тока короткого замыкания при зажигании дуги и во время его работы, а также для регулирования сварочного тока путем изменения индуктивного сопротивления дросселя.

Индуктивное сопротивление изменяют двумя способами: регулировкой воздушной прослойки (зазора) в магнитопроводе (меняя положение его подвижной части) или изменяя число витков катушки дросселя (с помощью поворотного шунта). Для безопасного обслуживания сварочного трансформатора требуется установка защитного заземления корпуса T_p проводником PE . Электродуговая сварка позволяет получить высокое качество сварного шва, ей соответствует большая производительность, требуются сравнительно простые аппараты, возможна автоматизация производственного процесса.

Существуют и другие методы сварки с использованием электрического тока. Один из них – это контактная сварка (сварка за счет сопротивления). Этим методом выполняют стыковую, точечную и роликовую сварки.

Для плавного уменьшения напряжения электрической дуги в принципе можно использовать и автотрансформаторы. Но так как в них первичная и вторичная обмотки электрически связаны, то электросварщик может попасть

под полное напряжение сети (220 или 380 В), что недопустимо по условиям безопасности производства работ. Поэтому автотрансформаторы в электросварочных процессах не используются.

Безопасность электросварочных работ обеспечивается техническими средствами и организационными мероприятиями в соответствии с ГОСТ 12.3.003-75 «Электросварочные работы. Общие требования безопасности» и «Правилами пожарной безопасности при проведении сварочных и других огневых работ». Требования безопасности при проведении сварочных работ:

- Магнитопровод и корпус сварочного трансформатора должны быть заземлены;
- При работе в сосудах на фазном сварочном проводнике должно быть установлено реле напряжения, действующее на отключение при холостом ходе трансформатора и замене сварочного электрода;
- Подключение и отключение сварочного трансформатора от сети и наблюдение за исправным состоянием являются обязанностью электротехнического персонала;
- Сварочные работы на предприятиях проводятся после оформления наряда-допуска и получения разрешения на проведение огневых работ;
- Сварщик должен иметь соответствующее удостоверение на право проведения сварочных работ, быть проинструктирован и использовать защитный костюм;
- Сварка должна проводиться в вентилируемом помещении с применением местного отсоса газов, образуемых при сварке.

4.6 АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Применение автотрансформаторов обусловлено необходимостью регулирования выходного напряжения на вторичных обмотках трансформатора Тр. С этой целью обмотка низкого напряжения ω_1 составляет часть обмотки высокого напряжения ω_2 (см. рис. 4.6).

Электроэнергия в автотрансформаторах передается не только электромагнитным путем, но и за счёт непосредственной связи обмоток.

Напряжения и токи в автотрансформаторе связаны теми же соотношениями, как и в обычном трансформаторе:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\omega_1}{\omega_2} \approx \frac{I_1}{I_2}.$$

Токи I_1 и I_2 противоположны по фазе, поэтому в общей части обмотки ω_1 протекает ток $I_{12} = I_2 - I_1$.

Для всей передаваемой мощности, называемой проходной, можно записать:

$$S = U_2 \cdot I_2 = U_2(I_1 + I_{12}), \quad (4.6)$$

$$S = U_2 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_{12} = S_Э + S_M, \quad (4.7)$$

где $S_Э$ – мощность, передаваемая из обмотки ω_1 в обмотку ω_2 благодаря электрической связи;

S_M – мощность, передаваемая из обмотки ω_1 в обмотку ω_2 магнитным путем.

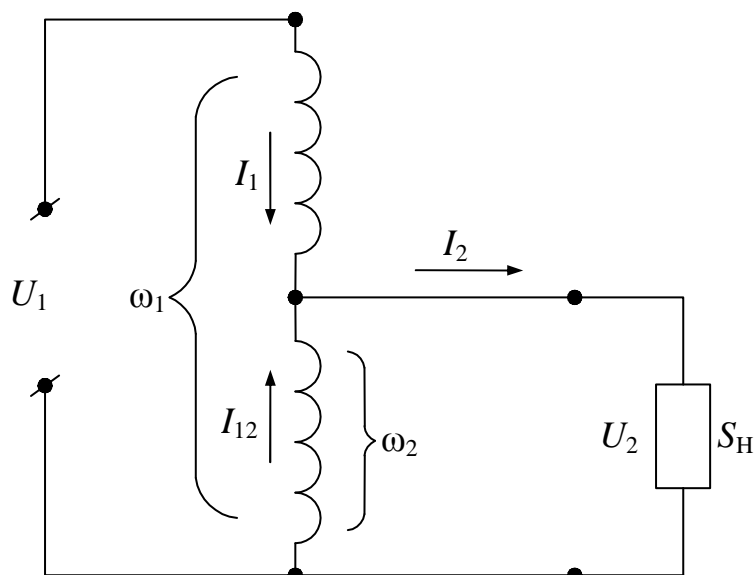


Рис. 4.6. Принципиальная схема автотрансформатора:

U_1 – высокое напряжение на первичной обмотке Тр, В; U_2 – низкое напряжение на вторичной обмотке Тр, В; ω_1 – число витков первичной обмотки; ω_2 – число витков вторичной обмотки; I_1 – ток первичной обмотки, А; I_2 – ток на выходе из трансформатора, А; I_{12} – ток в общей части вторичной обмотки, А; S_H – внешняя нагрузка трансформатора

Магнитная мощность определяет размеры магнитопровода и, так как она составляет лишь часть проходной мощности, то при изготовлении автотрансформатора можно использовать магнитопровод меньшего сечения, чем при создании обычного трансформатора той же мощности. Это позволяет экономить сталь.

Помимо этого при изготовлении автотрансформатора экономится медь. С уменьшением сечения магнитопровода уменьшается средняя длина витка; обмотки имеют общую часть и эта часть обмотки ω_2 может быть выполнена проводом меньшего сечения, чем обмотки низкого напряжения обычного трансформатора той же мощности.

Однако преимущества автотрансформатора существенны лишь при малых коэффициентах трансформации. При увеличении K_T всё больше сказывается принципиальный недостаток автотрансформатора – наличие электрической связи его обмоток. Из-за этого возрастает опасность поражения током лиц, пользующихся распределительной сетью за трансформатором. Кроме того, обе цепи (первичная и вторичная) должны

быть одинаково изолированы по отношению к земле, что ведет к удорожанию сети и самого автотрансформатора.

Корпус автотрансформатора должен быть заземлен проводником *РЕ*.

4.7. ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИЕ РЕАКТОРЫ

Реакторы служат для ограничения токов короткого замыкания КЗ в электрических схемах и установках, а также позволяют поддерживать определенный уровень напряжения в сети при повреждении за реактором.

Общий вид токоограничивающего реактора показан на рис. 4.7.

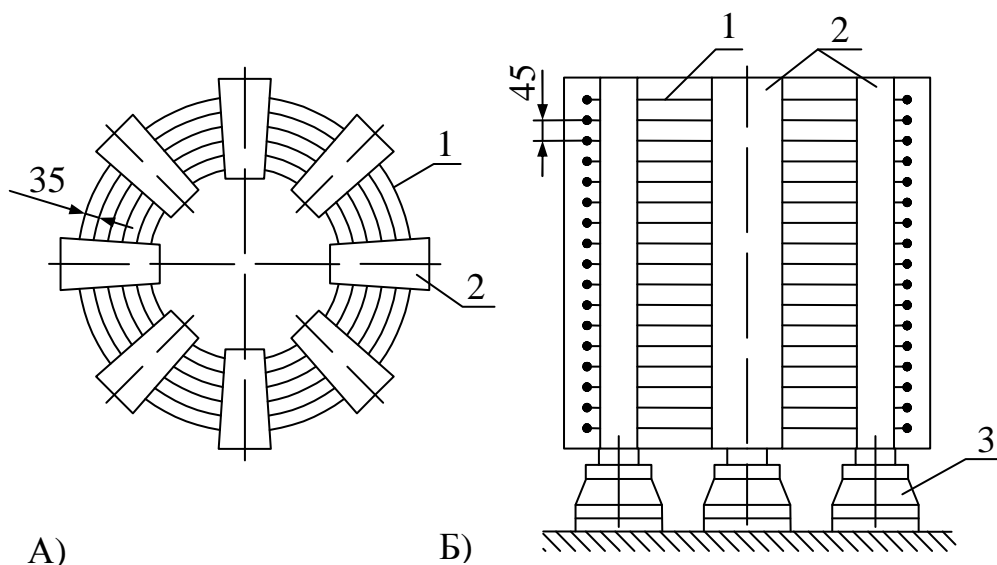


Рис. 4.7. Токоограничивающий реактор:

А – вид сверху; Б – вид сбоку; 1 – обмотка реактора; 2 – бетонные колонны; 3 – фарфоровые изоляторы

Обмотка реактора 1 состоит из многожильного алюминиевого провода, изолированного несколькими слоями кабельной бумаги и хлопчатобумажной обмотки. Обмотка наматывается на специальный каркас, а затем в определенных местах заливается бетоном. Бетон образует колонны 2, которые закрепляют витки обмотки, предотвращая их смещение под действием электродинамических сил и собственной массы. Бетонный каркас пропитывается и обрабатывается изолирующими лаками. Изоляция реактора от заземленных частей и от соседних фаз осуществляется при помощи опорных фарфоровых изоляторов 3.

Бетонные реакторы изготавливаются однофазными на токи до 4000 А для внутренней и наружной установки. В распределительных устройствах три фазы реактора могут устанавливаться вертикально одна над другой или горизонтально или ступенями (две фазы вертикально и одна рядом). В обозначении реактора это соответствует типам РБ, РБГ, РБУ.

Потери активной мощности в реакторах невелики 0,1-0,2% проходной мощности, но в реакторах на большие номинальные токи (2500-4000 А) предусматривают принудительный обдув для улучшения охлаждения, так как выделяемое в них тепло ведет к нагреву обмоток.

Индуктивное сопротивление реактора X_p зависит от количества витков в его обмотке и их геометрических размеров:

$$X_p = \omega \cdot L = 2\pi fL, \quad (4.8)$$

где ω – угловая частота переменного тока, Гц;

f – циклическая частота тока, Гц;

L – индуктивность магнитного потока, Гн.

Так как реактор не имеет стального магнитопровода, то сопротивление X_p не зависит от тока и остается постоянным как в нормальных режимах, так и при протекании увеличенных токов КЗ.

Токоограничивающие реакторы устанавливаются в линиях 6-10 кВ или в цепи трансформатора для ограничения токов КЗ до таких значений, которые позволяли бы применить сравнительно легкую коммутационную аппаратуру (выключатели, разъединители) и не завышать сечение кабелей в сети электроснабжения.

В нормальном режиме ток, протекающий по реактору, вызывает потерю напряжения, %:

$$\Delta U = X_p \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot \sin\varphi}{U_{ном}} \cdot 100\%, \quad (4.9)$$

где X_p – сопротивление реактора, Ом;

I – активный ток реактора, А;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение сети, В.

Допустимая потеря напряжения в реакторе обычно не должна превышать 2%.

При больших токах (2500-4000 А) и больших значениях X_p это требование может быть не выдержано. В этом случае применяются сдвоенные реакторы с принудительным обдувом воздухом для улучшения охлаждения, так как выделяемое в них тепло ведет к нагреву обмоток.

Ремонт и обслуживание дугогасящих реакторов должны проводиться в строгом соответствии с «Правилами эксплуатации электроустановок потребителей» [10].

ТИПОВЫЕ СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Автоматическое управление электродвигателями осуществляется путем применения в электрических цепях различных аппаратов. Автоматически осуществляют пуск двигателя, регулирование частоты его вращения, торможение, остановку, а также защиту от коротких замыканий, перегрузок и другие операции.

Рассмотрим несколько типовых схем автоматического управления электродвигателями переменного и постоянного токов.

5.1. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

В промышленных электроустановках наибольшее распространение получили трёхфазные асинхронные двигатели, работа которых основана на использовании вращающегося магнитного поля статора. Преимущества асинхронного двигателя состоят в простоте устройства, изготовления и эксплуатации, а также в большой надежности и сравнительно низкой стоимости, схема управления которого показана на рис. 5.1.

Ротор асинхронного двигателя набирают из стальных штампованных листов в форме диска. В продольные пазы листов укладываются медные или латунные стержни, замкнутые по концам ротора короткозамыкающими колодами. Такой ротор не имеет внешних выводов. Управлять асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором можно с помощью магнитного пускателя. Магнитный пускатель размещают в удобном для оператора месте и на любом расстоянии от двигателя.

Согласно схеме управления (см. рис. 4.7), можно осуществить автоматический пуск двигателя в двух направлениях вращения, условно названных «Вперед» и «Назад» и выполнить его остановку.

Схема управления асинхронным двигателем работает следующим образом.

- При включении ручного выключателя QS двигатель не трогается с места, так как его контакторы $KM1$ и $KM2$ в главной цепи разомкнуты и напряжение на статор не подается.
- При нажатии на кнопку пуск $SB1$ (Вперёд) замыкается цепь, состоящая из последовательно включенных кнопок SB , $SB1$, $SB2$, $KM2$, катушки контактора $KM1$ и контактов тепловых реле $1PT$ и $2PT$. При этом изменяют своё положение блок-контакты. В результате замыкается контактор $KM1$, подается напряжение на обмотку статора и двигатель начинает вращаться (Вперёд).

- Для остановки двигателя необходимо нажать на кнопку *SB* «СТОП», при этом разрывается цепь катушки контактора *KM1*, его контакты размыкаются, обесточивают обмотку статора и двигатель останавливается.
- При нажатии на кнопку *SB2* (назад) двигатель будет вращаться в другую сторону, так как главные контакты и контактор *KM2* обеспечивают изменение чередования фаз и обратное вращение ротора.
- От коротких замыканий двигатель защищён плавкими предохранителями *FU*.
- При возникновении перегрузки нагревательные элементы тепловых реле *1PT* и *2PT*, включенные последовательно в главную силовую цепь, нагреваясь, разомкнут контакты *1PT* и *2PT* в цепи управления. Катушки контакторов *KM1* и *KM2* обесточатся и двигатель отключится.

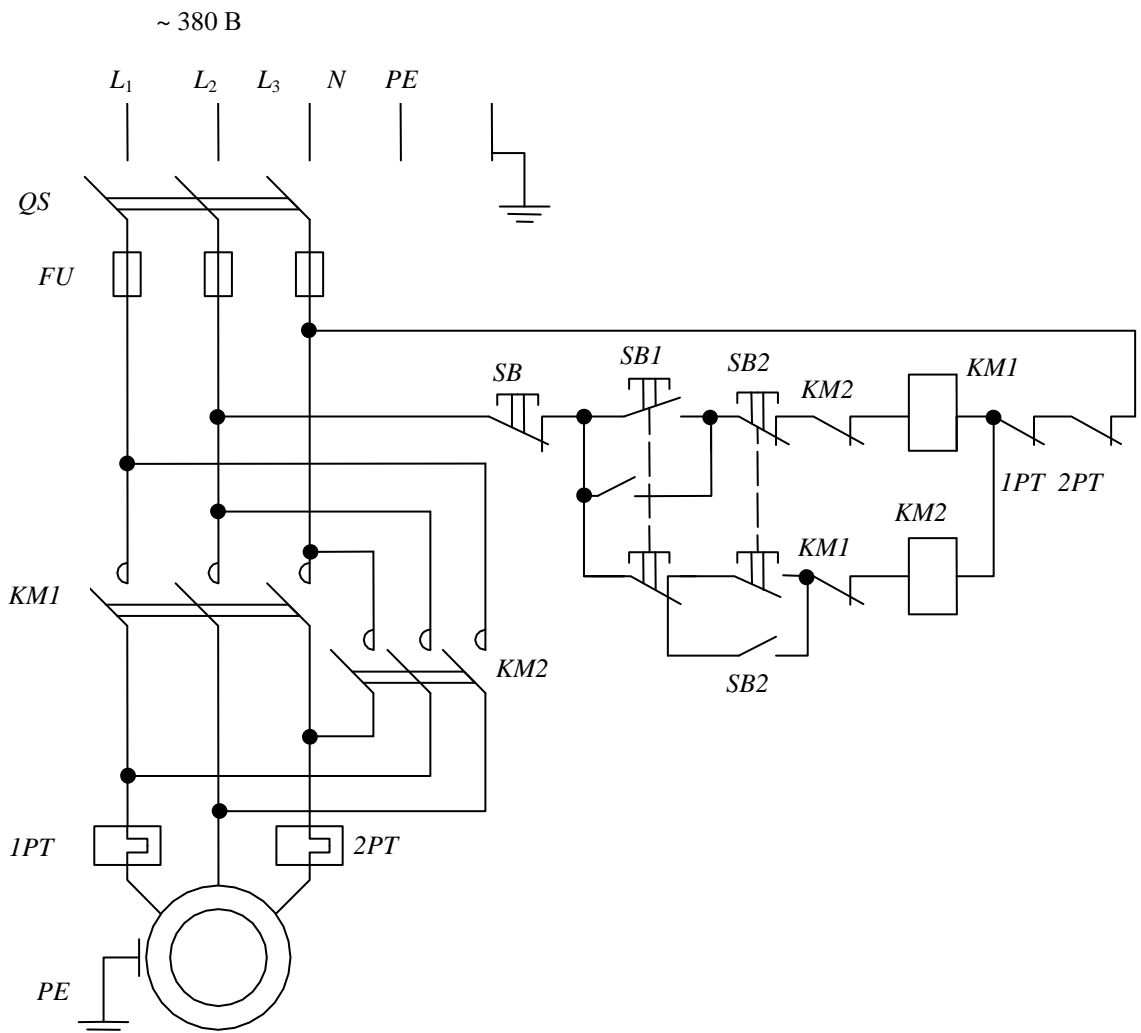


Рис. 5.1. Схема автоматического управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором:

QS – выключатель ручной; *FU* – предохранители плавкие; *SB* – кнопка «СТОП»; *SB1* – кнопка «ПУСК» при движении «Вперёд»; *SB2* – кнопка «ПУСК» при движении «Назад»; *KM1* – контактор, катушка, контакт при движении «Вперёд»; *KM2* – контактор, катушка, контакт при движении «Назад»; *1PT*, *2PT* – тепловые реле и их контакты

5.2. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

В механизмах подъёма груза на мостовых кранах большое распространение получили асинхронные двигатели с фазным ротором серии *МТФ*, которые позволяют ступенчато изменять скорость движения груза в широких пределах и обеспечивать пуск и надежное торможение. Это достигается введением в цепь ротора пускорегулирующего реостата с дополнительными сопротивлениями R_1 , R_2 и R_3 , как это показано на рис. 5.2

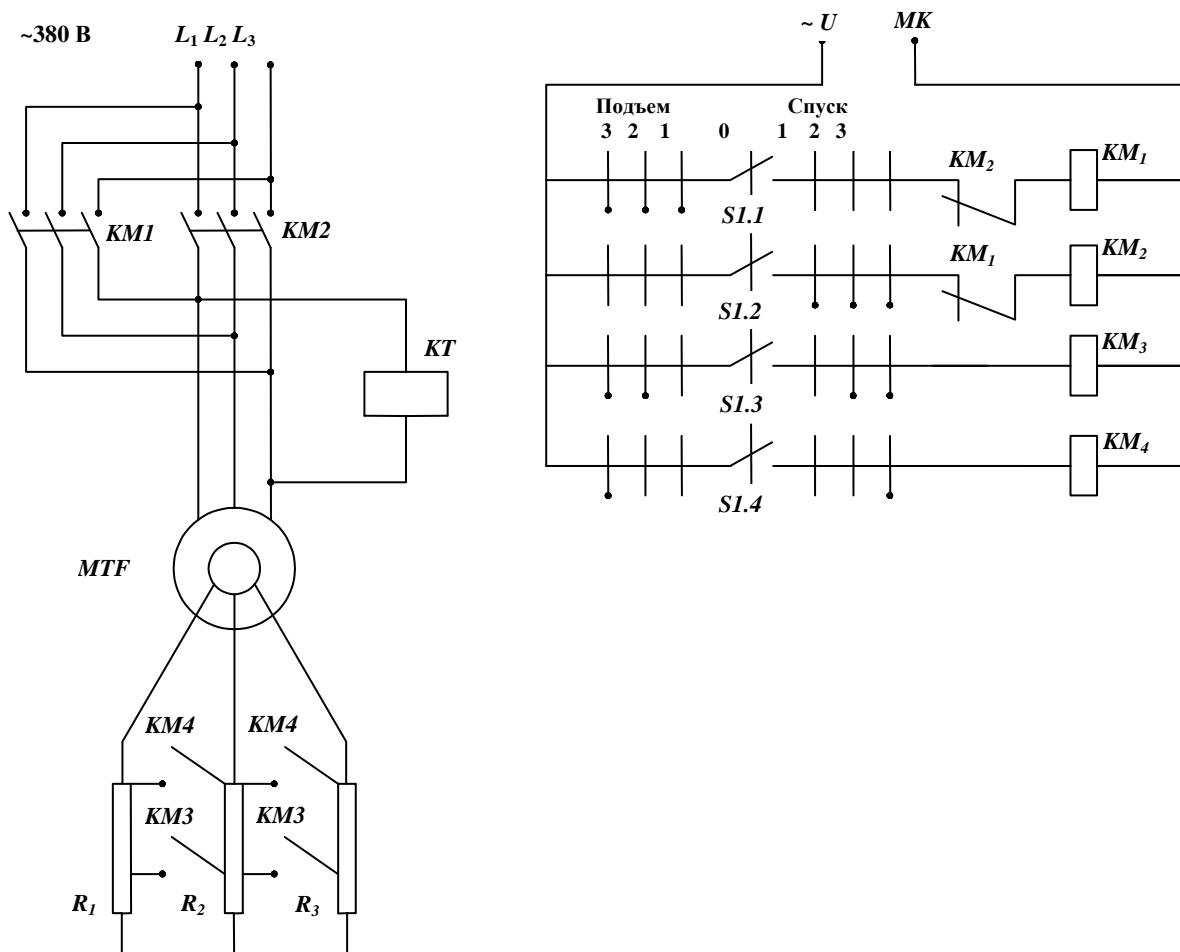


Рис. 5.2. Схема управления асинхронным двигателем с фазным ротором:

$KM1$; $KM2$ – контакт, катушка, контактор цепи подъёма груза; $KM1$; $KM2$ – то же цепи спуска груза; $SI.1 \div SI.4$ – замыкающие контакты контроллера; *МТФ* – асинхронный двигатель с фазным ротором; *КТ* – катушка тормозного электромагнита; $R_{1,2,3}$ – сопротивление пускорегулирующего реостата; *МК* – магнитный контроллер

Схема управления с помощью магнитного контроллера *МК* работает следующим образом:

- В первом положении – 1 контроллера *МК* на «подъём» замыкается контакт *SI.1* и включается катушка *KM1*, которая замыкает ножки контактора *KM1* в силовой цепи статора. Катушка тормозного

электромагнита KT , получив питание, растормаживает муфту сцепления механизма подъема крана. В цепи ротора двигателя включены все сопротивления $R_{1,2,3}$ пускорегулирующего реостата и двигатель работает на искусственной механической характеристике I с частотой вращения n_I , преодолевая заданный момент сопротивления M_c , как это видно из рис. 5.3, на котором представлены механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором MTF .

- Во втором положении – 2 магнитного контроллера MK на «подъём» замыкается контакт $SI.3$ и включается катушка $KM3$, выводящая часть сопротивлений $R_{1,2,3}$ пускорегулирующего реостата из цепи питания ротора. Двигатель будет работать на искусственной характеристике II с повышенной частотой вращения n_{II} , преодолевая заданный момент сопротивления M_c , создаваемый тем же грузом.
- В третьем положении – 3 магнитного контроллера MK на «подъём» включается катушка $KM4$, которая, замыкая контакты $KM4$ в пускорегулирующем реостате, полностью выводит сопротивления $R_{1,2,3}$ из цепи ротора, закорачивая его обмотку. Ротор становится короткозамкнутым и двигатель работает на естественной механической характеристике III с повышенной частотой вращения n_{III} , преодолевая сопротивление груза.

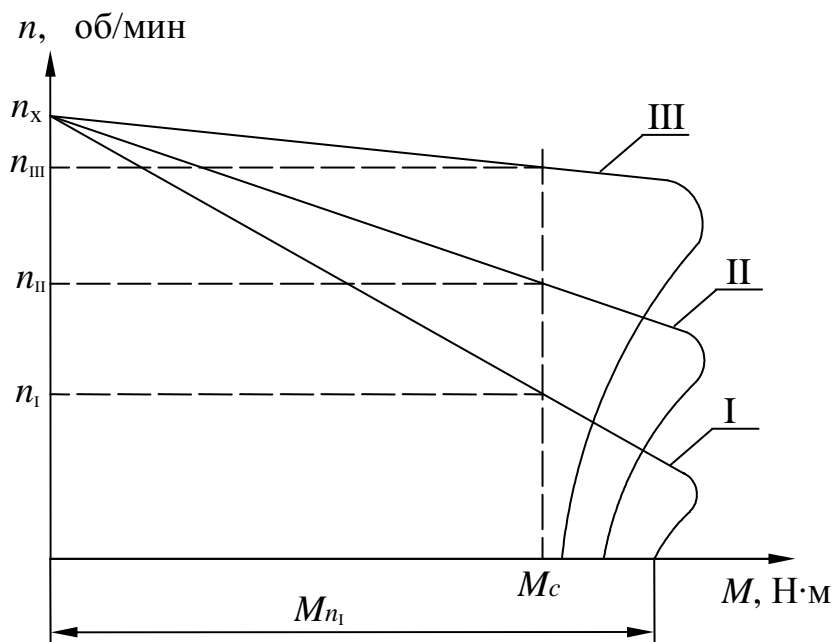


Рис. 5.3. Механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором:

I- II – искусственные характеристики реостатного регулирования; III – естественная характеристика; n , M – частота вращения, момент на валу двигателя; M_c – заданный момент сопротивления; M_{nI} – пусковой момент двигателя при работе на искусственной характеристике I

При спуске груза, переместив ручку магнитного контроллера вправо на «спуск» (см. рисунок) последовательность операций включения катушек, контактов и сопротивлений пускорегулирующего реостата происходит

аналогично процессу подъема груза при неизменной механической характеристике асинхронного двигателя с фазным ротором.

5.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Кроме машин переменного тока, в качестве генераторов и двигателей широко применяются машины постоянного тока. Генераторы используются для высококачественной сварки, зарядки аккумуляторов, питания электролитических ванн, в качестве машинных усилителей (для усиления электрических сигналов), тахогенераторов (для измерения частоты вращения) и т.д.

Двигатели постоянного тока обладают ценными характеристиками: позволяют плавно в широких пределах регулировать частоту вращения, создают большой вращающий момент при пуске. Поэтому они нашли применение в транспортных устройствах (трамваи, троллейбусы, электровозы, тепловозы, для привода оборудования прокатных цехов, в системах автоматики и т.п.).

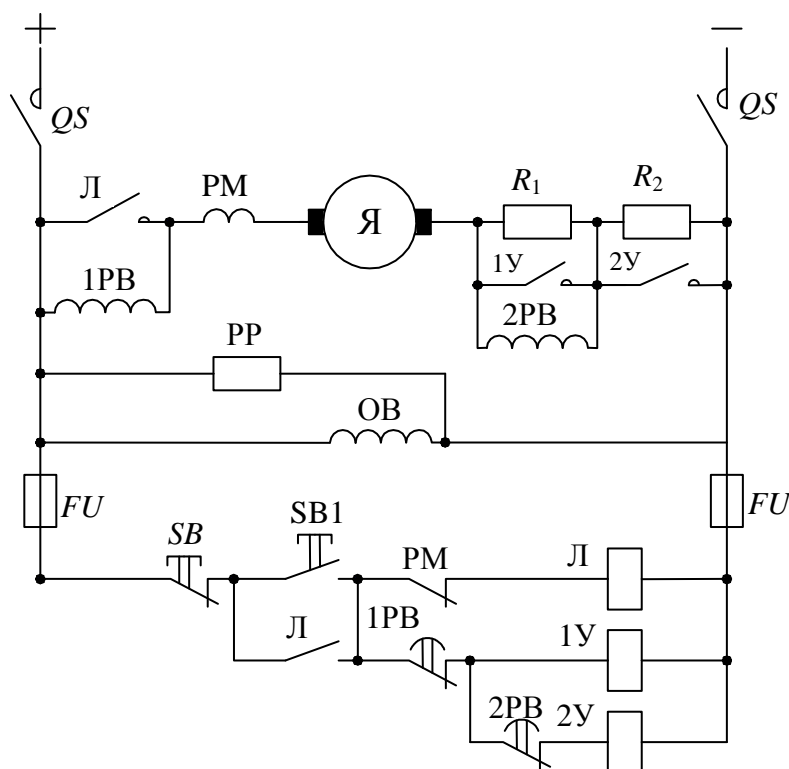


Рис. 5.4. Схема автоматического пуска и управления двигателем постоянного тока с параллельным возбуждением:

QS – выключатель ручной; *Л* – линейный контактор, катушка линейного контактора; *PM* – максимальное токовое реле, контакт токового реле; *Я* – якорь двигателя постоянного тока; *R₁*, *R₂* – сопротивления пускового реостата; *1Y*, *2Y* – контакторы ускорителя, катушки ускорителя; *1PB*, *2PB* – реле времени, контакты реле времени; *PP* – разрядный резистор; *OB* – обмотка параллельного возбуждения; *SB* – кнопка «СТОП» *SB1* – кнопка «ПУСК», с блокирующим контактом *Л*; *FU* – предохранители плавкие

На рис. 5.4 приведена схема автоматического пуска и управления двигателем постоянного тока с параллельным возбуждением. Пусковой реостат имеет две ступени R_1 и R_2 . Цепь якоря двигателя защищена от коротких замыканий максимальным токовым реле PM , а цепь управления – предохранителями FU . Автоматический пуск осуществляется с помощью линейного контактора L , двух контакторов ускорения $1У$, $2У$ и двух реле времени $1PB$, $2PB$.

Схема, представленная на рис. 5.4, работает следующим образом:

- При включении выключателя QS замыкаются две параллельные цепи. В первую цепь входят последовательно включенные элементы: катушка реле времени $1PB$, катушка максимального токового реле PM , обмотка якоря $Я$, сопротивления R_1 и R_2 пускового реостата, катушка реле времени $2PB$.

В этой цепи сопротивления PM , $Я$, R_1 и R_2 очень малы, а сопротивления катушек реле времени $1PB$ и $2PB$ велики, поэтому по главной первой цепи протекает малый ток.

Вторая параллельная цепь включает в себя обмотку возбуждения OB с разрядным резистором PP . По обмотке возбуждения протекает минимальный ток, но двигатель не трогается, так как через обмотку якоря течёт небольшой ток, не способный создать вращающий момент, который бы превышал пусковой момент.

- При нажатии на кнопку SBI «ПУСК» по катушке линейного контактора L потечет ток, цепь якоря двигателя замкнётся. Ток из сети потечёт по катушке реле максимального тока PM , через обмотку якоря двигателя и через сопротивления R_1 и R_2 пускового реостата. Двигатель трогается, преодолевая пусковой момент, и начинает вращаться.

В дальнейшем контакты и катушки реле ускорений $1У$ и $2У$ выведут полностью пусковой реостат с сопротивлениями R_1 и R_2 из работы. Дальнейший разгон двигателя и частота его вращения будут зависеть от напряжения, подводимого к якорю через его коллектор.

- При нажатии на кнопку SB «СТОП» цепь катушки контактора L разрывается и катушки ускорения $1У$ и $2У$ размыкают свои контакты $1У$ и $2У$ в цепи якоря. Двигатель отключается от сети и останавливается. Энергия магнитного поля обмотки возбуждения OB гасится в разряженном резисторе PP .

- При коротком замыкании в цепи якоря срабатывает максимальное токовое реле PM в цепи катушки контактора L . Двигатель отключается, так же, как и при нажатии кнопки SB «СТОП» [3].

5.4. ПОНЯТИЕ О ТИРИСТОРНОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Достижения в области электроники привели к широкому внедрению полупроводниковых приборов в схемы управления и регулирования частоты вращения электроприводов. Это объясняется высокими энергетическими и эксплуатационными показателями полупроводниковых приборов: малыми потерями энергии, высоким коэффициентом усиления по току и мощности, практической безинерционностью, постоянной готовностью к работе, малыми габаритами и значительным сроком службы.

Наиболее распространен тиристорный электропривод. Тиристоры (управляемые диоды) представляют собой полупроводниковые приборы типа $p - n - p - n$, созданные на основе четырехслойной кремниевой структуры, в которой чередуются слои с электронной и дырчатой проводимостью. К среднему слою с проводимостью типа p присоединен управляющий электрод, на который подается напряжение источника питания (управляющий сигнал). Источник питания необходим для управления моментом включения тиристора, что позволяет создавать различные схемы выпрямителей с регулируемым выходным напряжением. Таким образом, тиристор является электрическим ключом, пропускающим ток при малом падении напряжения и только в проводящую часть периода. Регулирование напряжения осуществляется путем изменения длительности включения тиристора. Управляющим сигналом можно задержать открытие тиристора, но нельзя прекратить пропускание тока до его естественного перехода через нуль. Сокращение длительности открытого состояния вентилей характеризуется углом запаздывания α_B .

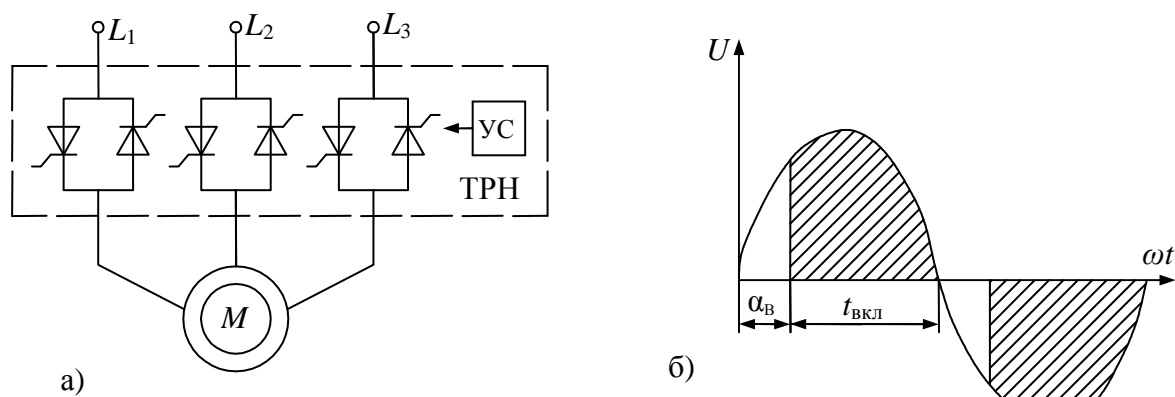


Рис. 5.5. Тиристорный способ регулирования напряжения:

а - силовая схема тиристорного регулятора напряжения (ТРН); *б* - принцип действия тиристорного регулятора; УС – управляющий сигнал

На рис. 5.5 показана схема тиристорного регулятора напряжения (ТРН), которым можно плавно и в широком диапазоне изменять напряжение на фазах статора асинхронного двигателя, получая различные механические характеристики $M = f(n)$.

Рассмотренная схема удобна для регулирования момента двигателя, но ограничивает диапазон регулирования его частоты вращения. Для

расширения диапазона регулирования в электропривод вводят обратные связи и другие элементы.

Перспективным является применение тиристорных преобразователей частоты и напряжения (ТПЧН) в схемах управления электроприводами (частотный электропривод). ТПЧН обеспечивает плавное и экономичное регулирование частоты вращения двигателей в широком диапазоне, в том числе и с короткозамкнутым ротором.

5.5. ЧАСТОТНО – РЕГУЛИРУЕМЫЙ ПРИВОД АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Функциональная схема частотно-регулируемого привода (ЧРП), представленная на рис. 5.6 широко применяется в системе управления асинхронными двигателями сетевых насосов системы отопления малых районов Мосэнерго.

В состав ЧРП входят: согласующий трансформатор, преобразователь частоты, выходной конденсаторный фильтр, асинхронный двигатель и устройство управления (см. рис. 5.6).

Входной согласующий трансформатор согласует напряжение сети 6 кВ с напряжением преобразователя частоты. Для подключения к сети 6 кВ ЧРП сетевых насосов используется двух или трехобмоточные трансформаторы сухого типа. Мощность трансформатора пересчитывается через мощность асинхронного двигателя по соотношению $P_{АД}^{НОМ} / 0,736 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

Двухобмоточные согласующие трансформаторы применяются в серии 1557, как правило, мощностью до 1250 кВт, а трехобмоточные трансформаторы – для более мощных ЧРП до 7500 кВт.

В состав преобразователя частоты (ПЧ) входят управляемый выпрямитель (УВ), сглаживающий реактор L звена выпрямленного тока и автономный инвертор тока (АИТ) с управлением широко-импульсной модуляции (ШИМ). Управляемый выпрямитель выполняется либо шестифазным с подключением к двухобмоточному трансформатору, либо двенадцатифазным с подключением к трёхобмоточному трансформатору. Каждое плечо выпрямителя в зависимости от схемы выпрямления и уровня напряжения содержит от двух до четырех сетевых, включаемых сигналом управления, тиристоров $СК$. Выбор схемы управления выпрямителя определяется условиями обеспечения электромагнитной совместимости ЧРП с сетью электроснабжения.

Автономный инвертор тока (АИТ) выполнен с последовательным соединением в каждом вентильном плече полностью управляемых тиристоров (GTO). Тиристоры автономного инвертора коммутируют выпрямленный ток с требуемой частотой вращения асинхронных двигателей. Высокочастотная составляющая тока инвертора фильтруется конденсаторной батареей, включенной на выходе инвертора параллельно обмотки статора асинхронного двигателя. Низкочастотная составляющая проходит через обмотки статора. Благодаря конденсаторному фильтру, на выходе ток и

напряжение статора существенно сглажены, что обеспечивает удовлетворительное электромагнитное согласование частоты регулируемого привода с частотой асинхронного двигателя. В устройстве управления применена микропроцессорная схема с развитыми элементами ввода и вывода аналоговых и дискретных сигналов. Для связи с автоматической системой управления тепловыми процессами (АСУ ТП) имеется соответствующий интерфейс. Для защиты ЧРП в его микропроцессорной системе управления предусмотрены максимально токовые защиты по входу и выходу от замыкания на землю, от перегрузок, от превышения частоты вращения.

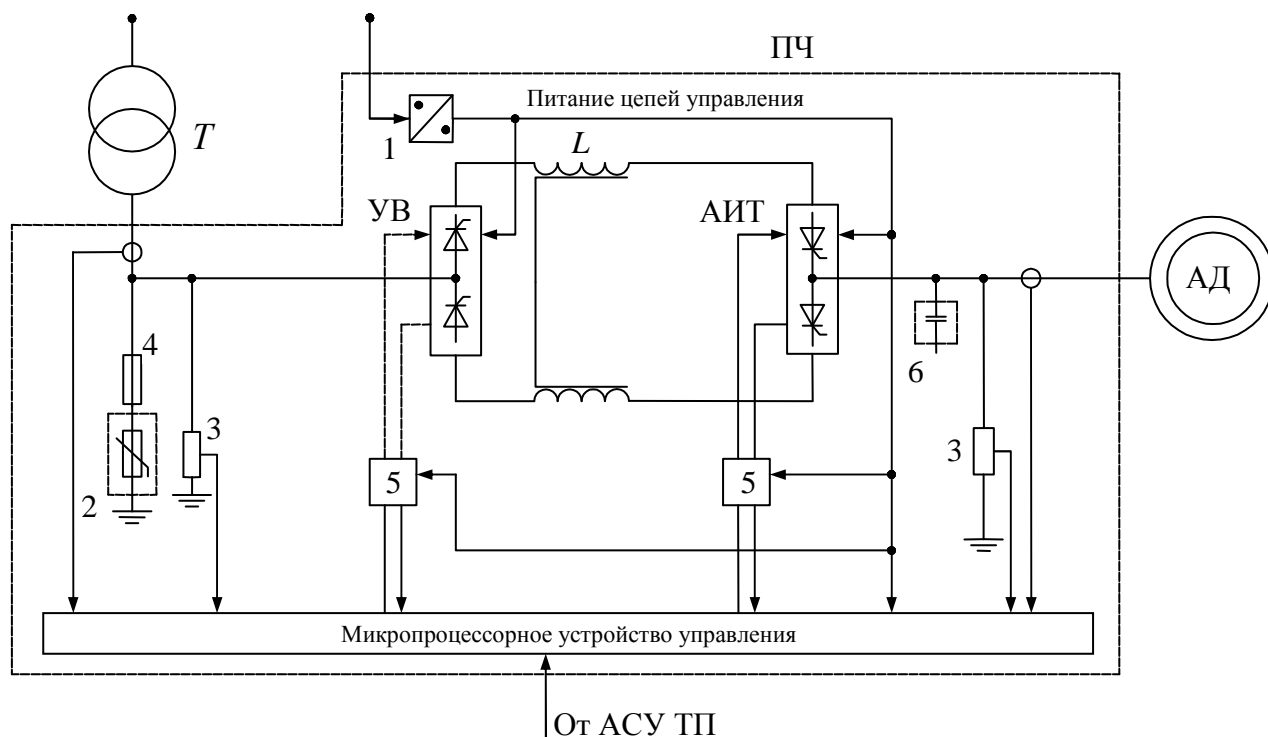


Рис. 5.6. Функциональная схема частотно – регулируемого привода асинхронного двигателя:

ПЧ – преобразователь частоты; *УВ* – управляемый выпрямитель; *АИТ* – автономный инвертор тока; *1* – источник питания цепей управления; *2* – ограничитель напряжения; *3* – делитель напряжения; *4* – предохранитель; *5* – интерфейсы драйверов выпрямителя и инвертора; *6* – фильтр-конденсаторная батарея; *T* – согласующий трансформатор; *L* – сглаживающий реактор; *АСУ ТП* – автоматическая система управления тепловыми процессами

В системе управления предусмотрена диагностика с выводом на дисплей терминала предупреждений и сообщений об авариях и отказах. Специальные тест – программы позволят выполнить проверочные режимы ЧРП: проверка без питания главных цепей, проверка под напряжением с током в контуре выпрямленного тока на выходе преобразователя частоты [3], [17].

ГЛАВА 6

СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Для обеспечения безопасности работ в электроустановках необходимо применять специальные средства защиты человека от поражения электрическим током. Эти средства дополняют защиту стационарных технических устройств: защитного заземления, зануления, защитного отключения и др. устройств.

Все средства защиты на электротехнических предприятиях: на трансформаторных, распределительных, тяговых подстанциях, на щитах управления производством, в электросиловых цехах т.п. находятся в закрытых помещениях и хранятся в специальных шкафах, ящиках и стеллажах при плюсовой температуре до 25 °С. Средства защиты выдаются под расписку электротехническому персоналу с группой по электрической безопасности III-IV-V.

Запрещается пользоваться средствами защиты, если истек срок испытания, если отсутствует бирка с индивидуальным номером, если имеются наружные видимые повреждения.

Согласно ГОСТ 12.1.009-79 ССБТ «Электрозащитные средства», все виды средств защиты делятся: на изолирующие, ограждающие, экранирующие и предохранительные.

А. Изолирующие средства защиты (СЗ) в свою очередь делятся на основные и дополнительные. Основные СЗ обладают изоляцией длительно выдерживающей рабочее напряжение. Ими можно касаться электрических установок (ЭУ) под напряжением. К ним относятся в электроустановках $U < 1000$ В: диэлектрические перчатки, изолирующие штанги, клещи, слесарно-монтажный инструмент, измерительные приборы, указатели напряжений. В установках $U > 1000$ В: это специальные изолирующие устройства, телескопические вышки, изолирующие лестницы.

Дополнительные средства защиты не обладают изоляцией способной выдержать рабочее напряжение. Их назначение усилить действие основных СЗ, вместе с которыми они применяются. К ним относятся:

- в установках $U < 1000$ В – резиновые галоши, боты, коврики, изолирующие подставки;

- в установках $U > 1000$ В – резиновые перчатки, боты, защитные костюмы, коврики, изолирующие накладки;

Б. Ограждающие средства защиты. Это временные переносные заземления для защиты людей при ошибочной подаче напряжения. Это ограждения, экраны, щиты, предупредительные плакаты.

В. Экранирующие средства защиты. Это костюмы с головными уборами, обувью и рукавицами, зонты, палатки.

Г. Предохранительные средства защиты. Предназначены для индивидуальной защиты от тепловых и световых излучений, от вредных, токсичных примесей, а также от механических воздействий и падений с высоты. Это защитные очки, щитки, каски, противогазы, монтажные пояса, канаты, когти.

Все изолирующие средства защиты подвергаются техническим испытаниям повышенным напряжением табл. 6.1.

Таблица 6.1

Испытание средств защиты

Средства защиты	Периодичность	Напряжение $U_{исп}$, кВ	Время испытания τ , мин
Изолирующие штанги	1 раз в год	$3 U_{л}$	5
Указатели напряжений	1 раз в год	до 1000 – 1 кВ >1000 В – $3 U_{л}$	1 5
Перчатки резиновые	1 раз в 6 мес.	6 кВ	1
Галоши	1 раз в год	3,5 кВ	1
Боты	1 раз в 3 года	15,0 кВ	1

Испытание изолирующих штанг

Испытанию подвергается изолирующая часть штанги на предмет перекрытия прохождению тока по поверхности.

Схема испытания изолирующей штанги показана на рис. 6.1.

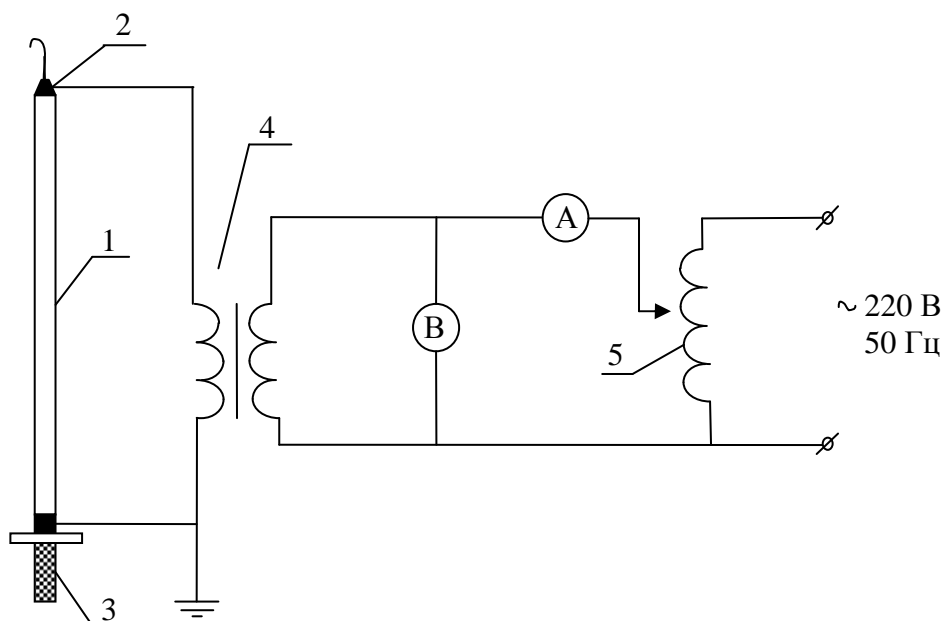


Рис. 6.1. Принципиальная схема испытаний изолирующей штанги:

1 – испытуемая изолирующая штанга; 2 – рабочая часть штанги; 3 – изолирующая часть (рукоятка) штанги; 4 – испытательный повышающий трансформатор; 5 – регулятор напряжения

При испытании изолирующей штанги один проводник от испытательного трансформатора 4 присоединяют к рабочей части штанги 2, а другой – к изолирующей части 3 на границе рукоятки выше упорного кольца, где для этого из полоски фольги наматывают временный электрод.

Штанга считается выдержавшей испытания, если в течение всего периода нахождения под испытательным напряжением на ее поверхности не возникали электрические разряды и не было отмечено колебаний в показаниях приборов вольтметра *PV* и амперметра *PA*. Кроме того, при ощупывании изолирующей части сразу после снятия напряжения не должно ощущаться местных нагревов.

6.1. СРЕДСТВА КОЛЛЕКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ

Согласно ГОСТ 12.4.0011-89, к коллективным средствам защиты человека от поражения электрическим током относятся:

- штанги изолирующие (измерительные, ремонтные и универсальные) – для выполнения всех операций в электроустановках всех напряжений;
- штангогасители – для снятия статических потенциалов;
- клещи изолирующие – для постановки и снятия предохранителей;
- указатели напряжений;
- изолирующие устройства с площадками для выполнения ремонтных работ;
- слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками для работы с напряжением $U < 1000$ В;
- изолирующие накладки из текстолита, гетинакса или резины для установки на ножи разъединителей при видимом разрыве.
- переносные заземления (ПЗ);
- временные ограждения, экраны, лестницы;
- предупредительные плакаты.

6.2. ПЕРЕНОСНЫЕ ЗАЗЕМЛЕНИЯ. ПОРЯДОК НАЛОЖЕНИЯ И СНЯТИЯ

Рассмотрим средство коллективной защиты, предназначенное для защиты людей при работе на отключенных участках сети или оборудовании от ошибочно поданного или наведенного напряжения.

Переносным заземлением соединяют коротко фазные проводники или шины между собой и с защитным заземлением. Благодаря этому, на отключенном участке или оборудовании, выведенном в ремонт, в случае ложной подачи напряжения будет обеспечена безопасность.

Вместе с тем, возникший при этом ток короткого замыкания вызовет быстрое отключение электроустановки релейной токовой защитой в источнике питания.

Конструкция переносного заземления, показана на рис. 6.2, состоит из изолирующей штанги 1, медных проводников 2, винтовых зажимов 3 и заземляющего проводника 4 с наконечником 5.

Медные неизолированные проводники имеют сечения в зависимости от тока КЗ, но не менее $S = 25 \text{ мм}^2$ ($d \sim 5,5 \text{ мм}$) при $U > 1000 \text{ В}$ и не менее $S = 16 \text{ мм}^2$ ($d \sim 4,5 \text{ мм}$) при $U < 1000 \text{ В}$.

Переносное заземление устанавливается и крепится при помощи изолированной штанги, управляя ею в диэлектрических перчатках.

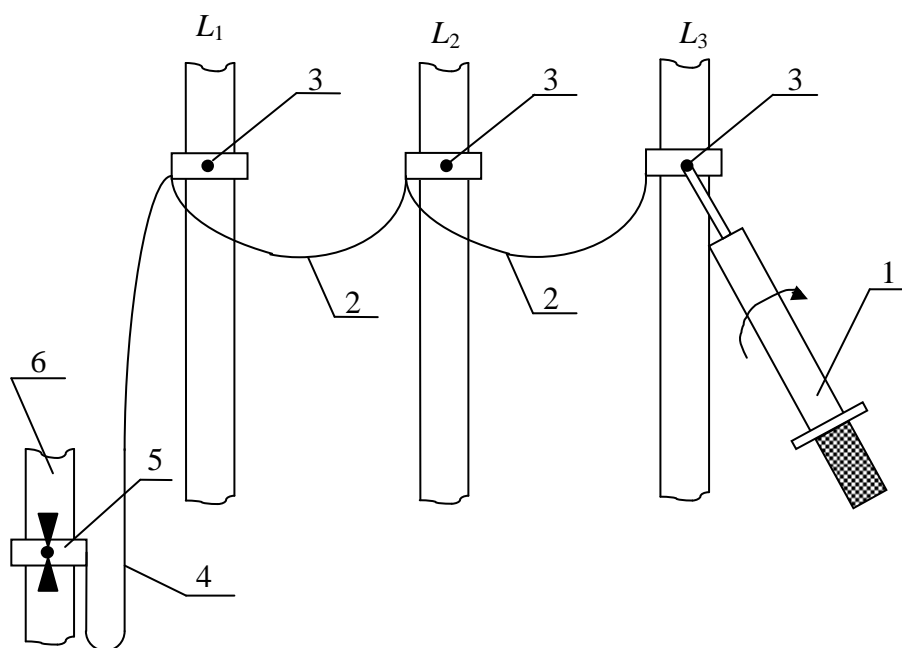


Рис. 6.2. Переносное заземление на $U > 1000 \text{ В}$:

$L1, L2, L3$ – фазные шины; 1 – изолирующая штанга; 2 – гибкие медные проводники ПЗ; 3 – винтовые зажимы; 4 – заземляющий проводник; 5 – наконечник заземления; 6 – шина стационарного заземления

Порядок наложения и снятия переносных заземлений

- проверить состояние ПЗ по наружному осмотру и наличию бирки;
- проверить отсутствие напряжения на выводимых в ремонт электрических установках. Осуществляется указателем напряжения при $U < 1000 \text{ В}$ или измерительной штангой при $U > 1000 \text{ В}$. Исправность указателя проверяется на действующих электрических схемах;
- соединить и закрепить заземляющий проводник ПЗ к стационарному заземлению;
- вторично проверить отсутствие напряжения;
- установить и закрепить винтовыми зажимами гибкие проводники ПЗ к фазным проводникам (кабелям) ЭУ или шинам $L1, L2, L3$.

Снятие переносных заземлений. Выполняется после проведения ремонта и закрытия наряда-допуска. Производится в обратном порядке:

- ослабить винтовые зажимы 2 (см. рис. 6.2) и снять гибкие медные проводники с фазных проводников или шин.
- отсоединить и снять заземляющий проводник 4 от шины стационарного заземления 6.

6.3. СРЕДСТВА ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

Согласно ГОСТ 12.4.011-89, к индивидуальным средствам защиты относятся: диэлектрические резиновые перчатки, галоши, боты, коврики, защитные очки, противогазы, монтерские когти, канаты, каски, экранирующие костюмы.

Перчатки резиновые диэлектрические. Назначение и требование к ним

- Перчатки предназначены для защиты рук от поражения электрическим током при работе в электроустановках до 1000 В – в качестве основного электрозащитного средства, а в электроустановках выше 1000 В – в качестве дополнительного, защитного средства.
- В электроустановках разрешается использовать перчатки с маркировкой Эн – для защиты от электротока напряжением до 1000 В и с маркировкой Эв – для защиты от электротока напряжением выше 1000 В.
- Длина перчаток должна быть не менее 350 мм. Размер перчаток должен позволять одевать под них шерстяные или хлопчатобумажные перчатки для защиты рук от пониженных температур при обслуживании устройств в холодную погоду. Перчатки могут быть пятипальными и двухпальными.

6.4. ИСПЫТАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕРЧАТОК. МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ

В период эксплуатации диэлектрические перчатки подвергаются периодическим электрическим испытаниям.

- Один раз в шесть месяцев перчатки необходимо испытывать повышенным напряжением 6 кВ в течение 1 мин, ток утечки через перчатку при этом не должен превышать 6 мА.
- При испытании перчатки погружают в металлический сосуд с водой, имеющий температуру 25 ± 10 °С, которая наливается также внутрь перчаток. Уровень воды как снаружи, так и внутри изделий должен быть на 50 мм ниже верхнего края перчаток, которые должны быть сухими.
- Схема испытательной установки приведена на рис. 6.3. Один вывод испытательного трансформатора 1 соединяют с сосудом 3, другой с рабочим заземлением 12.
- Внутри перчаток опускают электроды 4, соединенные с заземлением 12 через сигнальные лампы 6, либо через дроссель 8 и миллиамперметр 9.

При испытании переключатель П сначала устанавливают в положение 5 «А» для того, чтобы по сигнальным лампам определить отсутствие или наличие пробоя. При наличии пробоя переключатель устанавливают в положение 5 «Б» для измерения тока, проходящего через перчатку. Изделие бракуется, если ток проходящий через него, превышает норму 6 мА или происходят резкие колебания стрелки миллиамперметра.

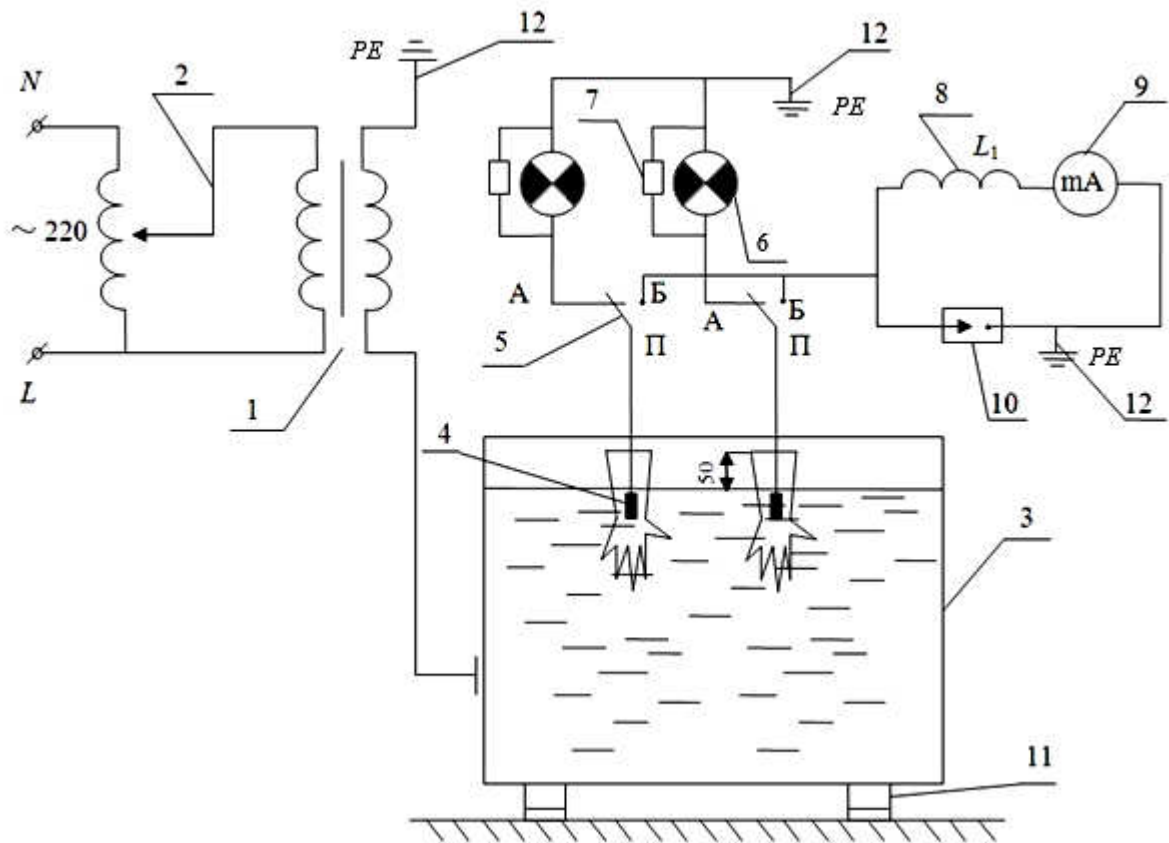


Рис. 6.3. Принципиальная схема испытания диэлектрических перчаток, бот и галош:

1 – трансформатор напряжения повышающий ТНП; 2 – реостат напряжения регулировочный Р; 3 – сосуд с водой; 4 – электроды; 5 – контакты переключателя П; 6 – лампы сигнальные - EL; 7 – шунтирующие сопротивления (15-20 кОм); 8 – дроссель токоограничивающий - L1; 9 – миллиамперметр - mA; 10 – разрядник - FV, защита от высокого напряжения; 11 – изоляторы; 12 – рабочее заземление PE

В случае возникновения пробоя отключают дефектное изделие или всю установку. После испытаний перчатки просушивают.

Перед употреблением перчаток следует проверить наличие проколов путем скручивания их в сторону пальцев.

Обувь специальная. Боты, галоши резиновые, диэлектрические

Назначение и требования к ним.

Обувь специальная диэлектрическая боты и галоши являются дополнительным электрозащитным средством при работе в закрытых, а при отсутствии осадков – в открытых электроустановках.

Диэлектрические боты и галоши защищают работающих от напряжения шага.

Обувь применяют: галоши с обозначением Эм – при напряжении до 1000 В; боты с обозначением Эв – при всех напряжениях.

Диэлектрическая обувь должна отличаться по цвету от остальной резиновой обуви.

Испытание диэлектрической обуви бот и галош

В период эксплуатации диэлектрические галоши испытывают напряжением 3,5 кВ, боты – напряжением 15 кВ в течение 1 мин. Токи, протекающие при этом через изделия, должны быть не более 2 мА для галош и 7,5 мА для бот.

Испытания проводят на установке, приведенной на рис. 6.2.

При испытаниях уровень воды как снаружи, так и внутри горизонтально установленных изделий должен быть на 20 мм ниже бортов галош и на 50 мм ниже края отворотов бот.

Меры безопасности при проведении испытаний средств защиты повышенным напряжением

- Испытания проводятся по оформленным нарядам-допускам при работах на электрических установках.

- К проведению испытаний допускается специалист, имеющий группу V по электрической безопасности в электроустановках напряжением выше 1000 В и персонал, имеющий группу IV – в электроустановках напряжением до 1000 В.

- Испытания проводятся в помещении I кл. по электрической безопасности с токонепроводящим полом и нормированными параметрами микроклимата.

- Рабочее место оператора испытательной установки должно быть отделено от той части установки, которая имеет напряжение выше 1000 В. Разделительная дверь должна быть снабжена блокировкой, снимающей напряжение с испытательной схемы в случае открытия двери. На рабочем месте оператора должна быть предусмотрена световая и звуковая сигнализация, извещающая о включении напряжения до и выше 1000 В и подаче испытательного напряжения.

- Испытательная установка и соединительные проводники должны быть ограждены экранами, щитами, канатами с предупреждающими плакатами «Испытание. Опасно для жизни», «Стой, высокое напряжение».

- При сборке испытательной схемы прежде всего должно быть выполнено защитное и рабочее заземление испытательной установки.

- Перед каждой подачей испытательного напряжения производитель работ должен:

- проверить правильность сборки схемы и надежность защитных и рабочих заземлений;

- проверить все ли члены бригады находятся на указанных им местах, удалены ли посторонние люди;

- оповестить бригады о подаче напряжения, после чего снять переносное заземление, если оно было установлено до начала монтажных работ.

- После окончания испытаний производитель работ должен снизить напряжение испытательной установки до нуля, отключить ее от сети напряжением 380/220 В, после чего отсоединить проводники от испытательной установки и снять ограждения. Закрывать наряд - допуск на работу.

- Занести результаты испытаний в журнал. Нанести номер и установить соответствующую бирку с указанием срока последующих испытаний.

ГЛАВА 7

ВИБРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Причины вибрации вращающихся механизмов – неуравновешенные силовые воздействия. Вибрация машин нарушает механические соединения, приводит к перегреву подшипников, вызывает искрение на коллекторах и контактных кольцах, увеличивает производственный шум, может вызвать аварийную остановку, привести к пожару, разрушениям и производственным травмам.

7.1. ПРИЧИНЫ И СРЕДСТВА СНИЖЕНИЯ ВИБРАЦИИ

В электрических машинах вибрация наиболее часто возникает из-за неуравновешенности (несбалансированности) масс вращающихся роторов, а также из-за действия электромагнитных сил. Основной причиной вибрации электромагнитного характера являются короткие замыкания в обмотках, создающие асимметрию магнитной системы машины. При коротком замыкании в обмотке ротора взаимное притяжение ротора и статора становится неравномерным; при вращении точка наибольшего притяжения будет все время перемещаться по окружности, вызывая вибрацию [6].

При деформации или биении ротора зазор между ротором и статором все время меняется, что также создает магнитную асимметрию и связанную с этим вибрацию.

К другим причинам вибрации электромагнитного характера, создающим магнитную асимметрию, следует отнести обрывы в обмотках роторов асинхронных машин, а также в пусковых обмотках роторов синхронных двигателей и генераторов.

Силы, вызываемые магнитной асимметрией в электрических машинах, приводящие к повышенной вибрации, называются *пандеромоторными*.

Магнитная вибрация, возникшая на синхронном турбогенераторе ТГФ – 300 с паровой турбиной К – 300 – 240 на Каширской ГРЭС 5 октября 2002г, привела к полному разрушению всего энергоблока $N = 300$ МВт с последующим пожаром, обрушением кровли машинного зала и человеческим жертвам [7]. Высокая вибрация возникла в результате короткого замыкания в цепи статора и разрушения бандажного кольца ротора генератора. Причинами неуравновешенности вращающихся роторов электрических машин могут быть раковины в литых частях, неоднородности материала, несимметричное распределение масс, смещение обмотки ротора вследствие ее недостаточной опрессовки или слабой насадки лобовых бандажных втулок (капп).

Неуравновешенность роторов электродвигателей и генераторов устраняется при помощи статической или динамической балансировки коротких или длинных роторов соответственно, подробно описанных в [7].

Во время вращения ротора при слишком большом зазоре в подшипниках скольжения вал приподнимается масляным клином, а затем, вследствие незначительного изменения вязкости масла и снижения давления в масляном клине, снова опускается, вызывая периодические колебания вала. Слишком низкая температура входящего масла даже при нормальных зазорах в подшипниках может служить причиной появления вибрации. Это наблюдается главным образом в машинах со смазкой под давлением. Температура поступающего в подшипники масла должна быть в пределах 35-40°С.

Причины механической вибрации могут быть определены по частоте вибрации. Если частота вибрации $f_{вб}$ совпадает с оборотной частотой вращения машины $f_{вр}$, то такая вибрация называется оборотной (ОВ), т.е. $f_{вб} = f_{вр}$. Основными причинами возникновения оборотной вибрации в электрических и тепловых машинах, насосных и компрессорных агрегатах являются:

- неуравновешенность вращающихся масс ротора;
- расцентровка осей вращения многоопорных роторов;
- тепловой прогиб вала;
- задевание ротора о неподвижные детали в концевых и промежуточных уплотнениях.

Вибрация оборотной частоты (оборотная вибрация), вызванная неуравновешенностью ротора, имеет характерные особенности, позволяющие отличить её от вибрации, вызванной другими причинами. Прежде всего, оборотная вибрация имеет синусоидальный характер и ее интенсивность растет с увеличением частоты вращения. Кроме того, вибрация оборотной частоты, вызванная неуравновешенностью масс, приводит к увеличению вертикальной составляющей вибрации v_x на опорных подшипниках машины и устраняется единственным способом – статической или динамической балансировкой ротора.

Статической балансировке подвергаются роторы, у которых размер рабочей части h (длина магнитной части ротора электрической машины) существенно меньше его полной длины l и наружного диаметра рабочей части d , т.е. $h \leq 0,1 \cdot l$ и $h < 0,5 \cdot d$. Такие роторы называются *короткими*. Для статической балансировки коротких роторов применяются специальные устройства. Наибольшее распространение получили балансировочные ножи – параллельные призматические полосы, выполненные из твердого металла, опорные поверхности которых устанавливаются в одной горизонтальной плоскости.

Динамическая балансировка длинных роторов, у которых размер рабочей части h соизмерим с его полной длиной l и его диаметром, т.е. $h = (0,5 \div 0,9)l$ и $h > 0,5 \cdot d$ более сложный технологический процесс проводится либо в собственных подшипниках при наличии доступа к корректирующим (балансировочным) плоскостям без выемки ротора из статора, либо на специальном балансировочном станке, как правило, в

период капитального ремонта. Технология статической и динамической балансировок, как отмечалось выше, подробно описана в литературе [7].

Вибрация оборотной частоты может быть инициирована расцентровкой осей вращения смежных роторов. При этом увеличивается вибрация, действующая в горизонтальной плоскости в осевом v_z и поперечном v_y направлениях, и устраняется такая вибрация центровкой полумуфт, соединяющих смежные роторы (см. рис. 7.1)

Особенностью вибрации, вызванной расцентровкой, является ее местный характер. Обычно наблюдается интенсивная вибрация корпусов тех подшипников, валы которых соединены с расцентровкой. При этом наиболее сильно изнашиваются баббитовые заливки вкладышей этих опорных подшипников.

Таким образом, выбор конкретного технического средства, необходимого для устранения вибрации оборотной частоты и принимаемого в связи с этим решения, зависит от конкретных величин v_x , v_y и v_z , полученных после снятия вибрационных характеристик на всех опорных подшипниках машины. Вывод поясняется с помощью рис. 7.1.

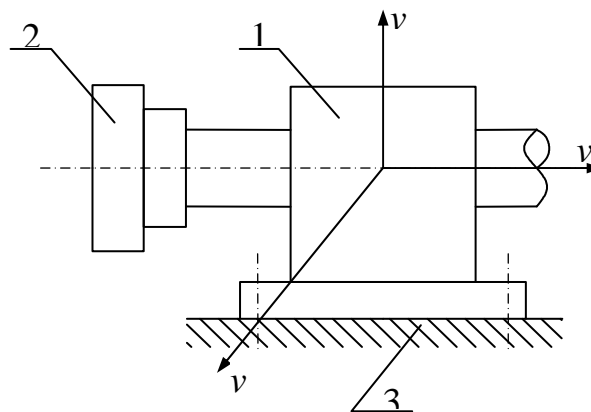


Рис. 7.1. Составляющие вибрации оборотной частоты:

1 – опорный подшипник; 2 – полумуфта сцепления; 3 – фундаментальная плита;
 v_x – вертикальная составляющая вибрации; v_y – поперечная составляющая горизонтальной вибрации; v_z – осевая составляющая горизонтальной вибрации

Принимаемые решения:

- если вертикальная составляющая вибрации v_x превышает осевую v_z и поперечную v_y составляющую горизонтальной вибрации и превышает нормированное значение $v^{\text{норм}}$, т.е. $v_x > v_y > v_z$ и $> v^{\text{норм}}$, следует выполнить балансировку ротора;
- если осевая составляющая v_z горизонтальной вибрации превышает вертикальную v_x и поперечную v_y составляющие вибрации и нормированную $v^{\text{норм}}$, т.е. $v_z > v_x, v_y$ и $> v^{\text{норм}}$, следует провести торцевое (угловое) центрирование осей вращения по сцепляющим полумуфтам соответствующих роторов (см. гл. 8);
- если поперечная составляющая v_y горизонтальной вибрации превышает вертикальную v_x , осевую v_z и нормированную $v^{\text{норм}}$

вибрации, т.е. $v_y > v_x$, v_z и $> v^{\text{норм}}$, следует осуществить радиальное центрирование соответствующих роторов по их сцепляющим полумуфтам (см. гл. 8).

Кроме неуравновешенности масс роторов и их расцентровок, прогиб вала, а следовательно, вибрацию оборотной частоты может вызвать тепловая неравномерность металла в сечениях ротора. В этом случае волокна металла, имеющие большую температуру, расширяются сильнее волокон с меньшей температурой. Вследствие этого, ротор прогибается в сторону с более высокой температурой.

Величину максимального прогиба f_{max} можно определить по приближенной формуле

$$f_{\text{max}} = \frac{\alpha \cdot \Delta T \cdot l}{8 \cdot d_B}, \text{ м}, \quad (7.1)$$

где α – коэффициент линейного расширения металла вала.

Для стальных валов принимают $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$, м/К;

ΔT – разность температур верхних и нижних слоев ротора, К;

l – расстояние между опорными подшипниками, м;

d_B – средний диаметр вала ротора, м.

Для исключения неравномерного нагрева роторов тепловых машин и электрических генераторов агрегаты снабжаются валоповоротным устройством, которое непрерывно работает с частотой вращения 3 – 4 об/мин до полного остывания машины при остановке и пуске в работу.

Характерной особенностью вибрации оборотной частоты, вызванной тепловым изгибом вала, является ее исчезновение по мере равномерного прогрева ротора. Таким образом, тепловой прогиб роторов имеет временный характер. Но в роторе электрического генератора в случае несовершенной системы охлаждения может возникнуть стационарное неравномерное температурное поле и стационарный прогиб, вызывающий длительную вибрацию.

Любые задевания вращающегося ротора о неподвижные детали в концевых и промежуточных уплотнениях увеличивают вибрацию оборотной частоты.

В тех случаях, когда вибрация возникает при частоте $f_{\text{вб}}$ близкой или равной половине частоты вращения ротора $f_{\text{вр}}$, т.е. $f_{\text{вб}} = \frac{1}{2} f_{\text{вр}}$, вибрация называется *низкочастотной* (НЧ). Низкочастотная вибрация – это автоколебательный процесс, при котором колебания, возникнув по любой причине, поддерживают сами себя, даже если эта причина перестала существовать. Одной из характерных особенностей автоколебаний является их «затягивание», показанное на рис. 7.2.

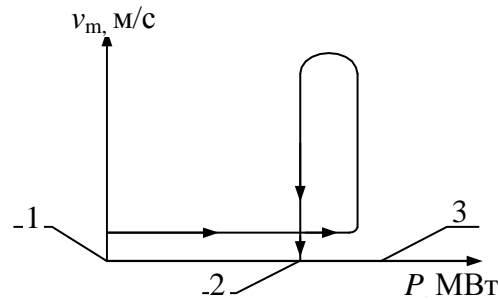


Рис. 7.2. «Затягивание» низкочастотной вибрации:

1 – холостой ход; 2 – снижение мощности для прекращения НЧ-вибрации; 3 – «пороговая» мощность; v_m – амплитуда виброскорости

Из рис. 7.2 видно, что интенсивная НЧ-вибрация возникает при некотором значении мощности (эту мощность называют «пороговой», так как она дает начало неустойчивому вращению ротора), но не прекращается немедленно после ее снижения. Необходимо значительно уменьшить мощность машины для прекращения НЧ-вибрации. Например, при наладке одной из паровых турбин с турбогенератором мощностью 800 МВт низкочастотная вибрация возникла при 720 МВт, а для ее устранения потребовалось снижение мощности до 650 МВт.

Возникновение низкочастотной вибрации может происходить в результате действия следующих эксплуатационных и конструктивных факторов:

- Нарушение регламента пуска машины и скорости набора мощности. Вероятность возникновения НЧ-вибрации при работе на холостом ходу увеличивается;
- Несоблюдение нормированных зазоров в подшипниках скольжения при их цилиндрической расточке;
- Отключение температуры масла на входе в подшипники от допустимых значений ($t^{\text{доп}}=38-42^\circ\text{C}$). Чем ниже температура масла, тем больше его вязкость и больше всплытие шейки вала и тем вероятнее потеря устойчивости вращения. Высокая температура приводит к снижению несущей способности масляной пленки и ее демпфирующих свойств, вызывает износ вкладыша и приводит к преждевременному старению масла;
- Устойчивость ротора против НЧ-вибрации снижается при износе баббитовой заливки вкладышей подшипника.

В тех случаях, когда восстановление нормированных зазоров при цилиндрической расточке, которые принимаются равными $X_B = 0,002 \cdot d$ и $X_G = 0,001 \cdot d$, где X_B и X_G – верхний и боковой зазоры соответственно; d – диаметр шейки вала, не устраняет НЧ-вибрацию, выполняется «лимонная» расточка вкладышей с увеличением боковых зазоров до величины, вдвое превышающей верхний зазор, т.е. $X_G = 2X_B$. Согласно ГОСТ 25364-97, эксплуатация энергетических машин с низкочастотной вибрацией – запрещена, если величина амплитуды виброскорости v_m превышает $0,5 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$.

Если частота вибрации $f_{вб}$ на энергетической машине вдвое превышает частоту вращения ротора $f_{вр}$, т.е. $f_{вб}=2 \cdot f_{вр}$, то такую вибрацию называют *высокочастотной*. Например, для турбогенератора, имеющего оборотную частоту вращения $f_{вр} = 50 \frac{1}{с}$, Гц, высокочастотная вибрация будет составлять $f_{вб} = 100 \frac{1}{с}$, Гц.

Вибрация двойной оборотной частоты возникает под действием силы веса при нарушении поперечной прочности в сечениях ротора в горизонтальном и вертикальном направлениях, т.е. по осям x и y . В этих направлениях моменты сопротивлений W_x и W_y становятся неравными между собой $W_x \neq W_y$, что и вызывает двойной прогиб и двойное колебание при вращении за один оборот.

Основным источником вибрации двойной оборотной частоты в энергетических агрегатах является синхронный электрический генератор с частотой вращения 50 Гц. Такой генератор имеет два полюса и две обмотки возбуждения, расположенные на противоположных поверхностях ротора, и поэтому его сопротивление изгибу различно в разных плоскостях.

Разница изгиба может достигать в современных мощных генераторах до 30÷40% и вызвать интенсивную высокочастотную вибрацию, которая создает большую опасность для электрической части генератора, для корпусов подшипников генератора и его фундамента. Особенно интенсивные колебания возникают, если турбогенератор имеет частоту вращения 50 Гц, а одна из критических частот вращения ротора также примерно равна 50 Гц. В этом случае возникает резонанс.

Для устранения вибрации двойной оборотной частоты применяются специальные технические средства, направленные на уменьшение разножесткости в сечениях ротора генератора: на большом зубе ротора, где отсутствуют пазы для секций обмоток возбуждения выполняют продольные фальшпазы или поперечные прорезы, или сверления.

Электрические генераторы турбин насыщенного пара, устанавливаемые предпочтительно на атомных станциях, имеют частоту вращения 25 Гц и менее подвержены высокочастотной вибрации, так как, выполняются с четырьмя полюсами и, следовательно, имеют более симметричную конструкцию ротора.

Согласно ГОСТ 22061-76, показателем качества балансировки роторов является величина $e \cdot \omega$, мм $\cdot \frac{\text{рад}}{с}$, где e – допустимый остаточный дисбаланс ротора, мм; ω – максимальная эксплуатационная угловая частота вращения ротора, $\frac{\text{рад}}{с}$, $\frac{1}{с}$ (радиан – дуга, это отношение длины дуги к длине радиуса окружности, поэтому величина рад безразмерная, т.е. равна 1).

Для роторов электрических машин установлены четыре класса точности балансировки роторов, приведенные в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Класс точности балансировки роторов

Класс точности	Наибольшее допустимое значение $e \cdot \omega, \text{ мм/с}$
6,3	6,3
2,5	2,5
1,0	1,0
0,4	0,4

Роторы электрических машин в зависимости от их массы в килограммах подразделяются: от 0,01 до 0,1 – микророторы; свыше 3 до 1000 – средние роторы; свыше 1000 – тяжелые роторы.

Для средних и тяжелых роторов используются классы точности балансировки 6,3; 2,5; 1,0, а для малых и микророторов – классы точности 2,5; 1,0; 0,4.

В зависимости от требований по вибрации электрические машины подразделяются, согласно ГОСТ 20815-93, на три категории:

- нормальные *N* (обычные электромашин);
- с пониженной вибрацией *R*;
- с особо жесткими требованиями по вибрации *S*.

Допустимые значения амплитуды виброскорости v_m для электрических машин, работающих совместно с механизмами приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Допустимые значения виброскорости электрических машин, работающих совместно с механизмами

Класс вибрации	Категория машины	Максимально допустимые значения $v_m^{\max}, \text{ мм/с}$
0,28	<i>S</i>	0,28
0,45		0,45
0,71		0,71
1,12	<i>R</i>	1,12
1,8		1,8
2,8		2,8
4,5	<i>N</i>	4,5
7,1		7,1

Примечания. ГОСТ 16921–83. Машины электрические вращающиеся. Допустимые значения вибрации [13]:

1. При значениях вибрации v_m^{\max} свыше 7,1 до $11,2 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$ работа агрегата ограничивается до семи суток. При значениях вибрации v_m^{\max} свыше $11,2 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$ работа машины не допускается – должно происходить автоматическое отключение системой защиты.

2. При низкочастотной вибрации ($f_{вб} \cong \frac{f_{раб}}{2}$) при значениях v_m^{max} , превышающих $0,5 \frac{мм}{с}$, должны приниматься меры по ее устранению. Дальнейшая эксплуатация не разрешается.
3. Приемка электрических машин, работающих совместно с механизмами, в эксплуатацию после монтажа, допускается при значениях v_m^{max} не превышающих $2,8 \frac{мм}{с}$ и $4,5 \frac{мм}{с}$ после капитального ремонта.
4. Стандарт распространяется на вращающиеся электрические машины с массой $0,5 \div 2000$ кг, рабочей частотой вращения $600 \div 12000$ об/мин [13].

7.2. ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ВИБРАЦИИ МАШИН

При наличии вибрации в колебательной системе агрегата двигатель затрачивает энергию не только на преодоление момента сопротивления приводного механизма M_c (Н: тормозного момента на роторе турбогенератора) и момента сопротивления в подшипниках роторов, но и на преодоление собственной вибрации в многоопорных энергетических машинах. Вибрация тормозит вращение и вибрационная мощность P_v всегда является тормозящей, т.е. часть мощности двигатель расходует на борьбу с вибрацией. В результате уменьшается активная мощность на зажимах турбогенератора или увеличивается потребляемая мощность на зажимах электрического двигателя.

Выражение для вибрационной мощности P_v можно представить в виде:

$$-P_v = F_v \cdot v_m^{max}, \frac{H \cdot м}{с}, \text{ Вт}, \quad (7.2)$$

где F_v – неуравновешенная вибрационная сила, Н;

v_m^{max} – максимальная амплитуда виброскорости опорных подшипников роторов машины, $\frac{м}{с}$;

$$F_v = \sum m \cdot 2A_m^{max} \cdot \omega^2, \text{ Н}, \quad (7.3)$$

где $\sum m$ – суммарная масса многоопорных роторов машины, кг;

$2A_m^{max}$ – двойная максимальная амплитуда смещения опорных подшипников роторов машины, м;

ω – угловая частота вращения роторов, $\frac{1}{с}$, Гц.

Тогда вибрационная мощность, т.е. мощность отбираемая вибрацией от двигателя, может быть выражена зависимостью

$$-P_v = \sum m \cdot 2A_m^{max} \cdot \omega \cdot v_m^{max}, \text{ Вт}. \quad (7.4)$$

Знак « \leftarrow » в формуле (7.4) означает – вибрационная мощность всегда является тормозящей.

В реальных условиях вибрационная мощность, особенно в агрегатах с повышенной вибрацией, может достигать значительных величин.

Расчеты выполненные по формулам (7.2), (7.3) и (7.4) показывают, что невыработанная вибрационная мощность турбогенератора ТГФ-120 с паровой турбиной Т-100-130 при оборотной частоте вращения $n = 3000$ об/мин, при нормированной амплитуде вибрации $v = 4,5 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$, суммарной массе роторов ВД, СД, НД, РГ и РВ равной 130т составляет величину около 30 кВт, или 0,03% от номинальной мощности 100 МВт.

Повышенная вибрация вызывает интенсивный износ и разрушение баббитовой заливки в опорных подшипниках, увеличиваются зазоры, нарушается гидродинамика масляного клина ослабляются связи отдельных половин вкладышей и корпусов подшипников, а также фундаментной плиты. Если фундамент недостаточно гасит передающиеся на него вибрации, то это приводит к неравномерной осадке фундамента, к взаимному перекосу опорных плит и, как следствие, к расцентровке валопровода и прогрессирующему нарастанию вибрации. Вибрация, выходящая за рамки допустимого, приводит к задеванию и интенсивному износу концевых и промежуточных уплотнений в проточной части тепловых и электрических машин. Увеличиваются радиальные зазоры, а следовательно, увеличиваются межступенчатые перетоки рабочего тела, снижается экономичность машины, уменьшается КПД.

В насосных агрегатах высокая вибрация, кроме отмеченных недостатков, вызывает ускоренный износ концевых сальниковых уплотнений, приводящий к большим протечкам рабочей среды через них.

Высокая вибрация представляет большую опасность для электрического генератора, так как она может привести к смещению электрических обмоток, ослаблению концевых бандажных втулок (капп) и, как следствие, к коротким замыканиям, механическим разрушениям и другим негативным последствиям. В электрическом генераторе недопустимо высокая вибрация может возникнуть из-за несовершенной системы охлаждения, что приводит к тепловому стационарному прогибу ротора турбогенератора.

Иногда последствия повышенной вибрации бывают катастрофическими и с человеческими жертвами.

На Каширской ГРЭС в 2002 г произошла тяжелейшая авария с человеческими жертвами на турбогенераторе ст. №3 с паровой турбиной К-300-240 и генератором ТВМ-300. Были полностью разрушены паровая турбина, электрический генератор, конденсатор, повреждены фундаменты и

несущие колонны, возник пожар и обрушились кровли машинного зала. Произошел разрыв валопровода турбины в восьми местах. Фрагменты корпусов цилиндров были заброшены на четырнадцатую отметку и за пределы машинного зала. Причиной аварии послужила высокая продольная вибрация ротора генератора в результате короткого замыкания в цепи статора и разрушения бандажной втулки ротора [7].

Особая опасность высокого уровня вибрации – это повышенная пожарная опасность при наличии органических масел в системе смазки и регулирования турбин и турбогенераторов, а также в агрегатах, перекачивающих взрывопожарные и токсичные продукты.

Вибрация увеличивает шум в производственных помещениях, приводит к трудноизлечимым вибрационным заболеваниям и механическим травмам, возникающих у персонала при ликвидации трудоемких неполадок. Опыт эксплуатации показывает, что примерно 30% времени вынужденных простоев турбоагрегатов и 30% производственных затрат связано с устранением последствий и вибрационной наладкой.

Уровень шума турбогенераторов на всех режимах при наибольшей частоте вращения не должен превышать $L_p = 90$ дБ (ГОСТ 253364-82). Предельные значения уровней шума электрических машин со степенью защиты IP44 (ГОСТ 16372-84) приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Предельные значения средних уровней шума электрических машин класса 1 (ГОСТ 16372-84)

$P_{\text{ном}}$, кВт (кВ·А)	L_p , дБ, для номинальных частот вращения, об/мин					
	600-900	900-1320	1320-1900	1900-2360	2360-3150	3150-3750
0,25-1,1	64/67	67/70	69/71	72/74	75/75	18/79
1,1-2,2	65/66	68/71	71/73	75/78	78/80	81/82
2,2-5,5	68/72	71/74	75/77	78/82	81/83	84/85
5,5-11	72/75	75/78	78/81	81/86	84/87	87/90
11-22	75/78	78/82	81/85	83/87	87/91	90/93
22-37	78/80	81/84	83/86	85/89	88/90	92/95
37-55	79/81	83/86	86/88	88/92	90/94	93/97
55-110	82/84	85/89	88/92	90/93	92/96	95/98
110-220	85/87	87/91	90/94	93/96	94/98	96/100
220-400	86/88	90/92	92/96	94/98	95/99	97/102
400-630	88/89	92/93	94/97	95/99	96/100	98/103
630-1000	90/91	93/95	95/99	96/100	97/101	99/104

По уровням шума электрические машины делятся на следующие классы:

Класс 1 – машины, к которым не предъявляются требования по ограничению уровня шума;

Класс 2 – машины, к которым предъявляются требования по ограничению уровня шума – машины экспертного исполнения;

Класс 3 – малозумные машины – трехфазные асинхронные двигатели малой мощности ~ 2,2 кВт и машины большой мощности, в которых предусмотрены малозумные подшипники качения, глушители вентиляционного шума или звукоизолирующие кожухи;

Класс 4 – особо малозумные машины, в конструкции которых предусмотрено, кроме мероприятий по классу 3, использование активных материалов для получения требуемого уровня шума [13, 280 с.].

ГЛАВА 8

ЦЕНТРОВКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Установленная на фундамент электрическая машина должна быть отцентрована относительно вала исполнительного механизма.

Центровка электрических машин с механизмами является ответственной операцией при монтаже и ремонте. Плохая центровка валов вызывает вибрацию электрической машины и механизма, приводит к перегрузке и износу подшипников, а также концевых уплотнений. Во взрывозащищенной электрической машине повышенная вибрация нарушает взрывонепроницаемое сопряжение вала с подшипниковым щитом, тем самым увеличивается опасность возникновения взрыва при появлении искры.

Центрирование осей вращения многоопорных роторов осуществляется центровкой соответствующих полумуфт, плотно насаженных на вал электрического двигателя и вал приводного механизма (насоса, компрессора, вентилятора и др.). Центровку по полумуфтам выполняют, используя специальные приспособления, позволяющие проводить необходимые замеры с помощью щупа или индикатора. Конструкция приспособлений (скоба, держатели для индикаторов, хомуты крепления) зависят от устройства полумуфт [6, с.87]. Приспособления для центровки должны обладать необходимой жесткостью и прочно крепиться на полумуфтах.

Полумуфты центрируемых валов с установленными на них приспособлениями совмещают по маркировкам, соответствующим их взаимному рабочему положению. Окружности обоих полумуфт делят на четыре равные части по вертикали и горизонтали, нанося соответствующие метки. В процессе центровки оба ротора со своими полумуфтами поворачивают совместно в направлении рабочего вращения механизма. При этом осевые смещения роторов, возможные при их повороте, не влияют на результаты центровки. Также на результаты замеров не влияет некоторая эксцентricность при насадке полумуфт на вал, так как полумуфты центрируемых валов совмещены по маркировкам и поворачиваются одновременно. В каждом положении выполняют замеры по радиусу окружности и по торцам полумуфт.

8.1. ТЕХНОЛОГИЯ ЦЕНТРОВКИ РОТОРОВ НАСОСНОГО АГРЕГАТА

Рассмотрим технологию центровки роторов электрического двигателя и центробежного насоса по их полумуфтам, см. рис. 8.1.

– *Предварительные работы*

Перед началом центровки выполняют следующие работы:

- а. Проверяют прилегание всех четырех опорных лап электродвигателя к фундаментной раме. Устраняют «триножие» металлическими прокладками под соответствующую опору статора электродвигателя.
- б. Проверяют состояние крепежа опорных лап электродвигателя. Необходимо убедиться в отсутствии заземления болтов или шпилек в отверстиях.
- в. Проверяют качество насадки и крепление обоих полумуфт. Зачищают наружные диаметры и торцевые поверхности полумуфт от повреждений, грязи и неровностей.
- г. Проверяют по уровню горизонтальное положение ротора насоса и электродвигателя. Уклон роторов в сторону собственных полумуфт после центровки не должен превышать $\Delta = 0,1$ мм/м.
- д. Роторы сдвигают в крайние положения в сторону полумуфт и устанавливают торцевой зазор между ними $3 \div 8$ мм в зависимости от температуры рабочей среды и теплового удлинения роторов насоса и электродвигателя во время работы. Тепловой зазор устанавливают смещением корпуса статора электродвигателя.
- е. Выполняют следующие замеры, см. рис. 8.1:
 D – наружный диаметр полумуфты, мм;
 l_1, l_2 – расстояния между опорными лапами А и Б электродвигателя, мм;
 L – полное расстояние от полумуфты до дальней лапы электродвигателя, $L = l_1 + l_2$, мм.
- ж. Наносят метки мелом на наружной поверхности обоих полумуфт в точках $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ и 270° .
- з. Устанавливают и закрепляют приспособление для центровки полумуфт по радиусу (центрирующую планку-скобу или хомут с индикатором). Приспособление устанавливается на полумуфте того ротора, который легче поворачивается без дополнительных усилий.

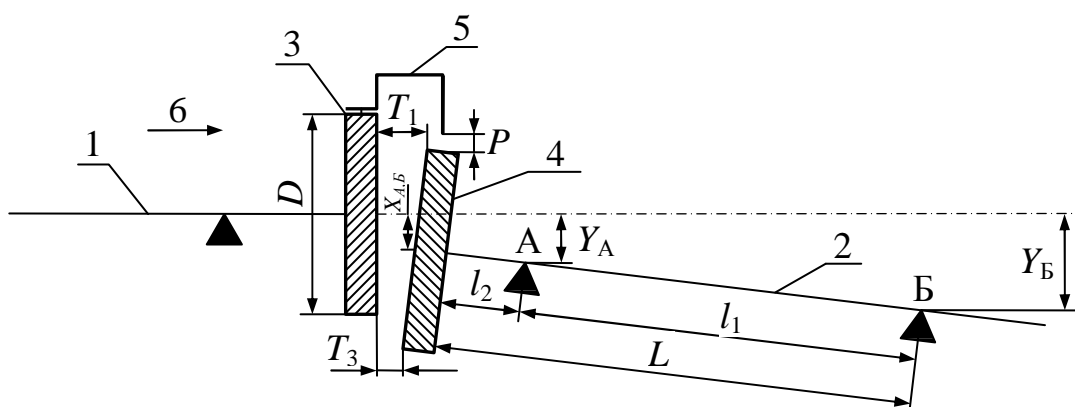


Рис. 8.1. Центрирование роторов с помощью скобы и щупа:

1 – ротор насоса; 2 – ротор электродвигателя; 3 – полумуфта насоса; 4 – полумуфта электродвигателя; 5 – скоба радиальных замеров; б – вид на электродвигатель;
 P – радиальные смещения; T_1, T_3 – торцевые (угловые) смещения; L, l_1, l_2 – расстояния между опорами и полумуфтой электродвигателя; D – диаметр полумуфт;
 Y_A, Y_B – перемещение опорных ламп А и Б электрического двигателя; $X_{A,B}$ – смещение конца вала электрического двигателя, мм

- *Измерение радиальных и торцовых (угловых) смещений полумуфт*
Обычно центровку роторов насосных агрегатов осуществляют по четырем положениям полумуфт. В других случаях, если в нижнем положении (180°) выполнять замеры затруднительно или невозможно по конструктивным причинам, центровка выполняется по трем положениям (0° , 90° и 270°). В этом случае величины радиальных и торцовых зазоров в нижней третьей точке находят расчетом из условия равенства сумм замеров в горизонтальных и вертикальных плоскостях.

$$\sum(P_2 + P_4) = \sum(P_1 + P_3) \text{ и } \sum(T_2 + T_4) = \sum(T_1 + T_3), \quad (8.1)$$

$$P_3 = (P_2 + P_4) - P_1 \text{ и } T_3 = (T_2 - T_4) - T_1, \quad (8.2)$$

где $P_{1,2,3,4}$; $T_{1,2,3,4}$ – радиальные и торцовые зазоры между полумуфтами, мм.

Рассмотрим процесс центрирования по четырем взаимным положениям полумуфт с помощью скобы и щупа (рис. 8.1 и 8.2).

- Устанавливают исходное взаимное положение полумуфт – метками (ноль – 0°) вверху;
- Последовательно оба ротора поворачивают на 90° , 180° и 270° , согласно сделанным меткам, и выполняют в каждом положении соответствующие измерения.
- В каждом положении производят пять замеров: один замер радиальный, например, P_1 выполняется при помощи скобы 5 (рис. 8.1) и четыре замера торцовых $T_{1,2,3,4}$ зазоров выполняются метрическим щупом между торцами полумуфт. Щуп вставляется плотно без особых усилий на глубину 10-12 мм.

Результаты измерений радиальных P и торцовых (угловых) T смещений полумуфт заносят на круговую диаграмму первоначальных замеров (рис 8.2).

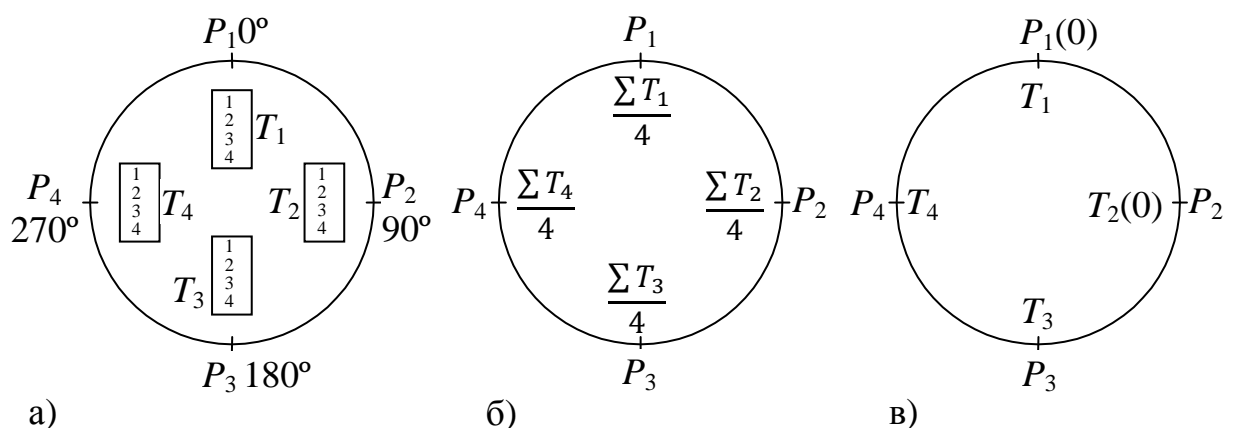


Рис. 8.2. Круговые диаграммы расцентровок роторов по четырем положениям полумуфт:

а – диаграмма первоначальных замеров; *б* – диаграмма средних значений; *в* – диаграмма приведенных значений; $P_{1,2,3,4}$; $T_{1,2,3,4}$ – радиальные и торцовые зазоры между полумуфтами соответственно, мм; $P_1(0)$; $T_2(0)$ – радиальные и торцовые замеры, приведенные к нулевым значениям, мм

Устранение радиальных и торцовых (угловых) расцентровок

Осуществляют следующим образом:

- Определяют суммарные и среднеарифметические значения величин торцовых (угловых) замеров $\sum T/4$ в каждом положении полумуфт. Результаты заносят на диаграмму средних значений (рис. 8.2, б);
- Полученную запись в диаграмме средних значений упрощают. Для чего из радиальных и торцовых величин минимальные значения. При этом получают по одной точке замеров P и T с нулевыми значениями, например, $P_1(0)$ и $T_2(0)$. Результаты расчетов наносят на круговую диаграмму приведенных значений (рис. 8.2, в);
- Определяют величину и характер расцентровки роторов насосного агрегата. При этом возможны следующие схемы взаимных положений роторов (рис. 8.3, а, б, в)

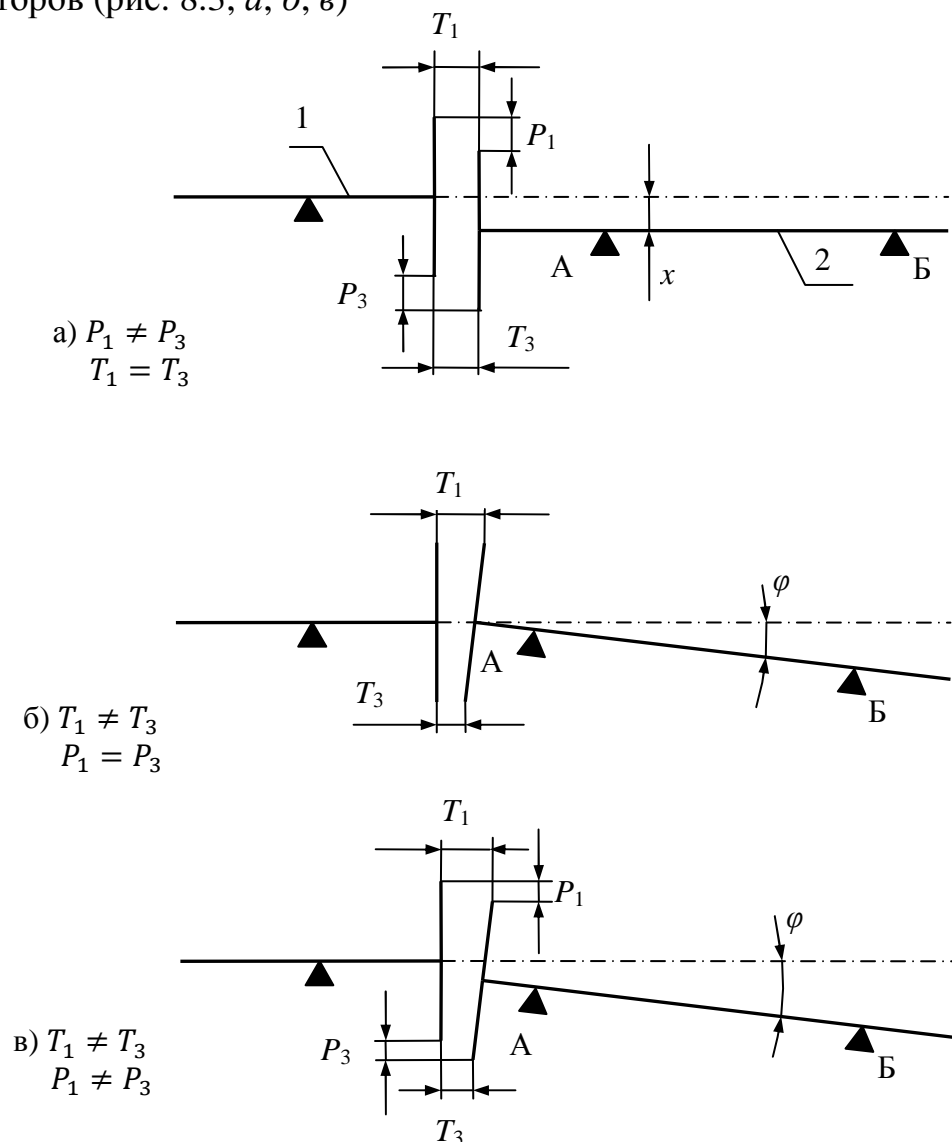


Рис. 8.3. Расцентровки роторов насосного агрегата:

а – ось одного ротора смещена параллельно оси другого ротора на величину $X = P_1$;
б – ось одного ротора расположена под углом φ к оси другого; *в* – ось одного ротора смещена параллельно оси другого ротора на величину $X = P_1$ и расположена под углом φ к оси другого; 1 – ротор насоса; 2 – ротор электродвигателя

Взаимный перекос и смещение роторов насоса и электродвигателя с достаточной степенью точности устраняют, используя следующие формулы. [12, с. 280]:

$$Y_{A,B} = \frac{l_1}{D} \cdot \Delta T, \text{ мм}, \quad (8.3)$$

где $Y_{A,B}$ – перемещение опорных лап А и Б статора электродвигателя для устранения торцовой (угловой) расцентровки (рис. 8.1);

l_1 – расстояние между опорами электрического двигателя;

D – наружный диаметр полумуфты электрического двигателя;

ΔT – торцовая расцентровка в вертикальной (T_1, T_3) или горизонтальной (T_2, T_4) плоскостях, мм (величины T_1, T_2, T_3, T_4 берутся из диаграммы приведенных значений, рис. 8.2, в);

$$X_A = \frac{l}{l_1} \cdot Y_A, \text{ мм}, \quad (8.4)$$

где X_A – смещение конца вала электродвигателя при перемещении опоры А на величину Y_A в соответствующую сторону;

$$X_B = \frac{l_2}{l_1} \cdot Y_B, \text{ мм}, \quad (8.5)$$

где X_B – смещение конца вала электродвигателя при перемещении опоры Б на величину Y_B в соответствующую сторону (рис. 8.1).

Расцентровка роторов насосного агрегата, как правило, устраняется за счет перемещения статора электродвигателя, связанного с электрической сетью гибким кабелем, в отличие от корпуса насоса, жестко скрепленного с нагнетающим и всасывающим трубопроводами. Для плавного перемещения массивного электрического двигателя целесообразно в фундаментной раме вблизи каждой лапы с обеих сторон приваривать гайки с отжимными болтами. Несоосность – радиальная расцентровка полумуфт в вертикальной плоскости (разница в зазорах P_1, P_3) устраняется изменением толщины прокладок либо под корпусами подшипников скольжения, либо под лапами электрических машин. Для прокладок применяется листовая сталь или стальная фольга.

В электрических машинах, у которых роторы опираются на выносные опорные подшипники скольжения, центровка осуществляется смещением вкладышей подшипников или их корпусов. При этом необходимо контролировать зазор в железном пространстве между ротором и статором X , не допуская его изменения на величину более 10% от $X^{\text{ном}}$.

Допустимые значения торцовых (угловых) расцентровок полумуфт при диаметре муфт сцепления $D = 500$ мм в соответствии со СНиП III-Г.10.2-62 приведены в табл. 8.1.

Параллельное смещение осей роторов (радиальная расцентровка полумуфт) должна быть не более 0,08; 0,07; 0,06 и 0,05 мм при частоте вращения роторов до 12,5; 25; 50 и более Гц соответственно [11, с.112].

Пример центровки насосного агрегата 14НДС с помощью скобы и щупа подробно рассмотрен в [7, с.43].

Таблица 8.1

Допустимые значения торцовых (угловых) расцентровок полумуфт, мм, при $D = 500$ мм*

Муфты сцепления	Частота вращения роторов, с ⁻¹			
	до 12,5	25	50	более 50
Жесткие	0,08	0,06	0,04	0,02
Упругие	0,10	0,08	0,06	0,04
Зубчатые	0,15	0,12	0,10	0,08

* – При диаметре муфты менее или более 500 мм указанные в табл. 8.1 допустимые значения должны быть уменьшены или увеличены пропорционально отношению диаметров.

При центровке валопроводов паровых и газовых турбин и электрических генераторов или центробежных компрессоров, которая осуществляется по описанной ранее технологии, необходимо учитывать тепловые расширения корпусов подшипников у разных цилиндров и возможные их проседания, например, от веса охлаждающей воды в конденсаторах паровых турбин. С учетом этих обстоятельств при монтаже и ремонте роторы сознательно устанавливаются с рассчитанными расцентровками для того, чтобы обеспечить центровку при переходе к рабочим условиям.

8.2. КОНТРОЛЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПОДШИПНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

При работе электрических компенсаторов или других крупных установок переменного тока, состоящих из нескольких машин, вдоль валопровода может действовать переменная ЭДС, которая вызовет протекание вихревых токов через опорные подшипники роторов агрегата, см. рис. 8.4.

Индуктируемая в валопроводе ЭДС может достигать нескольких вольт. Токи в подшипниках опасны тем, что образуют в масляном слое между шейками вала и вкладышами подшипников электрические дуги, которые разъедают поверхности шеек вала и баббитовую заливку вкладышей, «натаскивают» баббит на шейки вала, что вызывает чрезмерный нагрев подшипников и расплавление заливки вкладышей. Кроме того, электролитическое действие тока ухудшает качество масла, приводит к его почернению, что в свою очередь увеличивает температуру подшипников. Если электрическая машина соединена с другой машиной, например, с ротором паровой турбины, как на рис. 8.4, то возникший вихревой ток, повреждает подшипники или другие части этой машины.

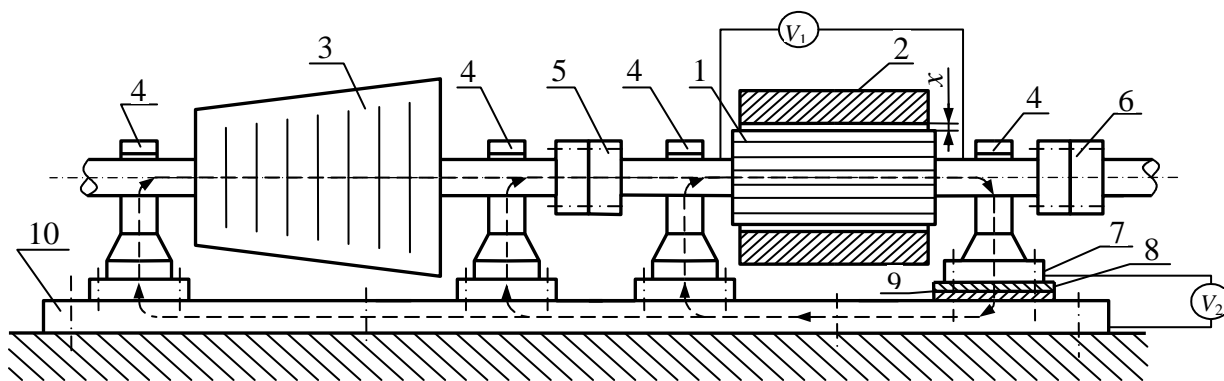


Рис. 8.4. Схема протекания вихревых токов в опорных подшипниках турбоагрегата:

1 – ротор электрического генератора; 2 – статор электрического генератора; 3 – ротор паровой турбины; 4 – опорные подшипники скольжения; 5 – муфта сцепления РТ и РГ; 6 – муфта сцепления РГ и ротора возбудителя; 7 – стул хвостового подшипника РГ; 8 – изолирующие прокладки; 9 – стальная фольга; 10 – фундаментная рама; V_1 , V_2 – измерители напряжения, В

Для устранения вихревых токов в их цепь (вал-подшипник-фундаментная рама-подшипник-вал) включают изолирующие прокладки 8 на рис. 8.4. Кроме главных изолирующих прокладок на хвостовом подшипнике (между стулом 7 и фундаментной плитой 10), выполненных из эбонита или гетинакса, применяют дополнительные прокладки, шайбы и втулки для изоляции всех шунтирующих цепей: болтов и шпилек маслопроводов, кабелей цепи возбуждения и температурной сигнализации.

Во избежание повреждений вихревыми токами, необходимо систематически контролировать целостность главных и дополнительных изоляционных прокладок, изолирующих хвостовой подшипник электрической машины от фундаментной рамы. Согласно [10], измерение сопротивления изоляции всех изолирующих устройств на стуле хвостового подшипника электрической машины производится в процессе монтажа и капитального ремонта. Сопротивление изоляции должно быть не менее 1 МОм.

Изоляцию стула хвостового подшипника проверяют до установки ротора электрической машины, так как после установки ротора все подшипники оказываются соединенными между собой через неизолированный хвостовой подшипник и фундаментную раму. По технологии монтажа или капитального ремонта сначала собирают электрическую машину, устанавливают ротор, а затем монтируют маслопровод. В подобных случаях необходимо проверить качество изоляции по элементам отдельно: сначала изоляцию стула хвостового подшипника, а затем маслопроводов после их сборки.

В условиях работающей электрической машины также можно проверить исправность изоляционной прокладки под стулом хвостового подшипника. Для этого применяют метод двух последовательных измерений напряжения в контуре: вал-подшипник-фундаментная рама-подшипник (рис. 8.4). Сначала измеряют напряжение U_1 на концах ротора, после этого

измеряют напряжение U_2 между изолированным стулом и фундаментной рамой. Если эти напряжения равны, то главная изоляционная прокладка в исправности, если второе U_2 напряжение меньше U_1 , то прокладка неисправна. Принято считать, что если U_1 и U_2 отличаются друг от друга больше чем на 10%, то это указывает на неисправность изоляции. Если же U_2 больше U_1 , то это указывает на ошибку измерения, которое должно быть повторено.

В настоящее время изоляция подшипников выполняется из двух слоев с прокладкой стальной фольги 9, см. рис. 8.4, что позволяет измерять и контролировать сопротивление изоляции хвостового стула без подъема ротора электрической машины.

Измерение напряжения U_1 и U_2 следует проводить вольтметром с малым пределом измерения и с малым внутренним сопротивлением, чтобы на результатах измерения не могло отразиться стекание с ротора машины электрических зарядов. Сопротивление изоляции стула хвостового опорного подшипника электрической машины должно быть не менее 1МОм при температуре 10-30 °С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Атабеков, А.Б.** Ремонт трансформаторов, электрических машин и аппаратов / А.Б. Атабеков. – М.: Высш. шк., 1994. – 383 с.
2. **Алиев, И.И.** Справочник по электротехнике и электрооборудованию: учеб. пособие для вузов / И.И. Алиев. – М.: Высш. шк., 2000.-225с.
3. **Иванов, И.И.** Электротехника: учеб. пособие для неэлектро-технических специальностей вузов / И.И. Иванов, В.С. Ревдоник. – М.: Высш. шк., 1984. – 375 с.
4. **Коновалова, Л.Л.** Электроснабжение промышленных предприятий и установок / Л.Л. Коновалова, Л.Д. Рожкова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
5. **Краевская, Н.П.** Электрооборудование химических производств: учеб. пособие для вузов / Н.П. Краевская, Б.В. Гринберг. – М.: Высш. шк., 1990.- 144 с.
6. **Лукьянов, Т.П.** Техническая эксплуатация электроустановок промышленных предприятий / Т.П. Лукьянов, Е.П. Егоров. – М.: Энергоатомиздат, 1985.- 352 с.
7. **Миндрин, В.И.** Вибрация энергетических машин. Технические средства защиты: учеб. пособие / В.И. Миндрин; НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород. 2011. – 81 с.
8. **Нащокин, В.В.** Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащокин. – М.: Высш. шк., 1975. – 496 с.
9. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд.- М.: ЗАО Энергосервис, 2002. – 280 с.
10. Правила эксплуатации электроустановок потребителей. – 5-е изд. – М.: ЗАО Энергосервис, 1997. – 282с.
11. **Рахмилевич, З.З.** Насосы в химической промышленности / З.З. Рахмилевич. – М.: Химия, 1990. – 330 с.
12. **Сверчков, А.И.** Ремонт и наладка паровых турбин / А.И. Сверчков. – М.: Машиностроение, 1954. – 482 с.
13. **Смирнов, А.Д.** Справочная книжка энергетика / А.Д. Смирнов, К.М. Антипов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 568 с.
14. **Фарамазов, С.А.** Охрана труда при эксплуатации и ремонте оборудования химических и нефтеперерабатывающих предприятий / С.А. Фарамазов. – М.: Химия, 1985. – 224 с.
15. **Миндрин, В.И.** Электрическая безопасность: учеб. пособие / В.И. Миндрин; НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород. 2002. – 80 с.
16. Электротехнический справочник / под общ. ред. Н.Н Орлова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. Т.3 290с.
17. **Ястребов, П.П.** Электротехника и электрооборудование: учеб. пособие / П.П. Ястребов [и др.]. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1987. – 384 с.

МИНДРИН ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ

РЕБРУШКИН МАКСИМ НИКОЛАЕВИЧ

**ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Редактор **Е.В. Комарова**

Компьютерный набор и верстка **М.Н. Ребрушкин**

Подписано в печать 16.10.2013. Формат 60x84^{1/16}. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,75. Уч.-изд.л. 6,0. Тираж 100 экз. Заказ 780.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.

Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, ГСП-41, г.Нижний Новгород, ул. Минина, 24.